ISSN 2307-5732
DOI 10.31891/2307-5732

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

1.2019

ВІСНИК Хмельницького національного університету

Технічні науки

Technical sciences

SCIENTIFIC JOURNAL
HERALD OF KHMELNYTSKYI NATIONAL UNIVERSITY

2019, Issue 1, Volume 269

Хмельницький

ВІСНИК
ХМЕЛЬНИЦЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
серія: Технічні науки

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

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

Хмельницький, 2019, № 1 (269)

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

Включено до науково-метричних 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
Голова редакційної колегії серії "Технічні науки"	**Бойко Ю.М.**, д. т. н., професор кафедри телекомунікацій та радіотехніки, начальник науково-дослідної частини Хмельницького національного університету
Відповідальний секретар	**Гуляєва В. О.**, завідувач відділом інтелектуальної власності і трансферу технологій Хмельницького національного університету

Члени редколегії

Технічні науки

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

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

Рекомендовано до друку рішенням вченої ради Хмельницького національного університету, протокол № 7 від 31.01.2019 р.

Адреса редакції: 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
e-mail: visnyk.khnu@gmail.com http://vestnik.ho.com.ua
http://lib.khnu.km.ua/visnyk_tup.htm

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

© Хмельницький національний університет, 2019
© Редакція журналу "Вісник Хмельницького національного університету", 2019

ЗМІСТ

МАШИНОЗНАВСТВО ТА ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ В МАШИНОБУДУВАННІ

В.О. ХАРЖЕВСЬКИЙ, М.В. МАРЧЕНКО
ВИКОРИСТАННЯ ВАЖІЛЬНИХ МЕХАНІЗМІВ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПЕРІОДИЧНОЇ ЗУПИНКИ ВИХІДНОЇ ЛАНКИ ТА ЇХ ОПТИМІЗАЦІЙНИЙ КІНЕМАТИЧНИЙ СИНТЕЗ 7

Р.В. АМБАРЦУМЯНЦ, А.П. ЛИПИН, С.А. РОМАШКЕВИЧ
КИНЕТОСТАТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ШАРНИРНОЙ ГРУППЫ АССУРА ЧЕТВЕРТОГО КЛАССА ВТОРОГО ПОРЯДКА 12

О.С. ПОЛІЩУК
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ РІЗАННЯ ВЗУТТЄВИХ МАТЕРІАЛІВ 17

O.P. MANOILENKO, V.A. GOROBETS, D.O. NENNO
DEVELOPMENT OF THE DOUBLE THREAD CHAIN STICH SEWING MACHINE WITH REVERSE MOVEMENT 27

А.О. СЯСЬКИЙ, Н.В. ШЕВЦОВА, О.Ю. ДЕЙНЕКА
МІЖФАЗНИЙ РОЗРІЗ В ОРТОТРОПНІЙ ПЛАСТИНЦІ З ЕЛІПТИЧНИМ КОНТУРОМ, ПІДСИЛЕНИМ ЗАМКНЕНИМ ПРУЖНИМ РЕБРОМ 31

А.Л. ГАНЗЮК, О.В. КРАВЧУК, А.І. ГОРДЄЄВ, В.В. ГРЕБЕЛЬСЬКИЙ, О.О. КУДИНОВ
СПЕЦІАЛЬНИЙ ПРИСТРІЙ ДЛЯ ДИСТАНЦІЙНОГО ПРИВЕДЕННЯ В ДІЮ РУЧНИХ ОСКОЛОЧНИХ ГРАНАТ ТА ЇХ ПІДРИВНИКІВ ІЗ ДОСЯГНЕННЯМ МІНІМАЛЬНОГО РИЗИКУ ДЛЯ ЖИТТЯ ВИБУХОТЕХНІКІВ 40

К.Є. ПОТОПАЛЬСЬКА, О.О. ЛАРІН
ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ РЕСУРСУ ЕЛЕМЕНТІВ ТРУБОПРОВОДУ З УРАХУВАННЯМ ПРОЦЕСІВ НАКОПИЧЕННЯ ВТОМИ ТА РОЗВИТКУ КОРОЗІЇ 46

ТЕХНОЛОГІЇ ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

А.Л. СЛАВІНСЬКА, О.П. СИРОТЕНКО, Ю. В. КОШЕВКО
ТЕХНОЛОГІЧНИЙ АСПЕКТ БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ВИРОБУ-ТРАНСФОРМЕРА 53

Л.Є. ГАЛАВСЬКА, О.В. ГНАТЮК
РОЗРОБКА АСОРТИМЕНТУ ТРИКОТАЖНИХ ВИРОБІВ ДЛЯ ДІТЕЙ ДОШКІЛЬНОГО ВІКУ З ВИКОРИСТАННЯМ ЛЛЯНОЇ ЕКО-СИРОВИНИ 63

М.С. ВИННИЧУК, Т.В. ЛУЦКЕР, М.А. ЛАЗАРЧУК, О.О. ПІДДУБНА
ДИЗАЙН-ПРОЕКТУВАННЯ МОДЕЛЕЙ КОЛЕКЦІЇ ЖІНОЧОГО ОДЯГУ В СТИЛІ «МІЛІТАРІ» ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ПЛОСКОГО ВИДУ ОЗДОБЛЕННЯ 70

А.І. БАБИЧ, В.П. КЕРНЕШ
РОЗРОБКА АСОРТИМЕНТУ ЖІНОЧОГО ВЗУТТЯ З УРАХУВАННЯМ СПОЖИВЧИХ ПЕРЕВАГ 77

А.Я. ГАНЗЮК, Д.М. ВИШНЕВСЬКА, Н.Л. ПОХИЛО, О.П. ШЕЛЕСТЮК, О.М. МІЩУК
ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ОЧИЩЕННЯ НАФТОПРОДУКТІВ ЗА ДОПОМОГОЮ АКТИВОВАНИХ СМЕКТИТОВИХ ГЛИН 82

О.Ф. БОГДАНОВА, А.О. ТІХОСОВА, В.В. ОЛІФІРУК, О.С. ЗАБРОДІНА
ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ НЕНАРКОТИЧНИХ КОНОПЕЛЬ В РІЗНИХ СФЕРАХ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ 91

С.Ю. БОБРОВА, Д.О. ШИПКО, Л.Є. ГАЛАВСЬКА
ДЕФОРМАЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ ТРИКОТАЖУ ДЛЯ ЗАХИСТУ РУК ВІД МЕХАНІЧНИХ УШКОДЖЕНЬ 96

О.В. ПАХОЛЮК, Г.О. ПУШКАР, І.С. ГАЛИК, Б.Д. СЕМАК
ВИКОРИСТАННЯ ДЕЯКИХ ПОЛІФУНКЦІОНАЛЬНИХ ОБРОБНИХ ПРЕПАРАТІВ ДЛЯ ЗАХИСТУ ТЕКСТИЛЬНИХ ЦЕЛЮЛОЗОВМІСНИХ МАТЕРІАЛІВ ВІД МІКРОБІОЛОГІЧНИХ ПОШКОДЖЕНЬ . 100

О.В. КАЛАШНИК, С.Е. МОРОЗ, Л.В. ПОЛІЩУК, О.В. КИРИЧЕНКО
ПОРІВНЯЛЬНЕ ТЕСТУВАННЯ ФАРФОРОВОГО ПОСУДУ 105

В.Г. ЄФІМОВА, Т.М. ПИЛИПЕНКО, Л.А. ХРОКАЛО, О.В. ЛЯШУК, С.Ф. ФЕДОРЧУК
ОТРИМАННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ ОСНОВИ ЕМУЛЬСІЙНИХ КОСМЕТИЧНИХ ПРОДУКТІВ З УРАХУВАННЯМ ПОВЕРХНЕВИХ ЯВИЩ У ДИСПЕРСНИХ СИСТЕМАХ 114

О.Я. СЕМЕШКО, Н.С. СКАЛОЗУБОВА
ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПІДГОТОВКИ НА КІНЕТИКУ СОРБЦІЇ ТА СТУПІНЬ ФІКСАЦІЇ АКТИВНИХ БАРВНИКІВ НА БАВОВНЯНОМУ ТРИКОТАЖІ 118

В.Г. КАПЛУН, В.А.ГОНЧАР, Т.В.ДОНЧЕНКО, П.В. МАТВІЇШИН
ВПЛИВ ІОННОГО АЗОТУВАННЯ ТА ЗАЛИШКОВОГО АУСТЕНІТУ НА ДОВГОВІЧНІСТЬ СТАЛІ ПРИ ТЕРТІ КОЧЕННЯ 122

РАДІОТЕХНІКА, ЕЛЕКТРОНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

А.А. МЯСИЩЕВ
ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛЕТНОГО КОНТРОЛЛЕРА CC3D С ПРОШИВКОЙ INAV 129

І.Ю. ЧЕРЕПАНСЬКА, А.Ю. САЗОНОВ, О.М. БЕЗВЕСІЛЬНА
ШТУЧНА НЕЙРОННА МЕРЕЖА ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО РОЗПІЗНАВАННЯ СКЛАДОВИХ ПОХИБОК ВИМІРЮВАННЯ 137

А.С. СВЕРСТЮК
КІБЕРФІЗИЧНІ БІОСЕНСОРНІ ТА ІМУНОСЕНСОРНІ СИСТЕМИ 145

А.В. ПРИЙМАК, О.В. САЛІЄВА, Я.Ю. ЯРЕМЧУК
ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ АЛГОРИТМУ ЦИКЛІЧНОГО НАДЛИШКОВОГО КОДУ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ СТІЙКОСТІ КРИПТОСХЕМИ ECIES 155

Н.О. ПУНЧЕНКО
НАДІЙНІСТЬ РОБОТИ СКЛАДОВИХ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ 162

Т.М. МАНСУРОВ, Р.А. ГАНИФАЕВ
АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ ОЦЕНОК СИСТЕМЫ FBM/D/1 ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ КАЧЕСТВА ОБСЛУЖИВАНИЯ МУЛЬТИСЕРВИСНОЙ СЕТИ 165

А.Д. ГАФУРОВА, В.В. КОВТУН
НЕЙРОМЕРЕЖЕВА АДАПТАЦІЯ PLDA ДЛЯ ВИКОРИСТАННЯ У АВТОМАТИЗОВАНІЙ СИСТЕМІ РОЗПІЗНАВАННЯ МОВЦЯ КРИТИЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ 172

О.А. КРАВЧУК
АНАЛІЗ НАЯВНОГО ПРОГРАМНО-ТЕХНІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЩОДО РОЗРОБКИ ПРОГРАМНОГО ПРОДУКТУ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ ОБРОБКИ ЗАМОВЛЕНЬ ІНТЕРНЕТ-МАГАЗИНІВ 178

В.С. ПЕТРУШАК
АНАЛІЗ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ АМПЛІТУДИ, ЩО БАЗУЮТЬСЯ НА ПЕРЕТВОРЕННІ ЗМІННОГО СТРУМУ В ПОСТІЙНИЙ 182

В.Т. КОНДРАТОВ
ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ МЕТРОЛОГИЯ: МАГНИТОПОЛЕВАЯ ТЕОРИЯ ИЗМЕРЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЯВЛЕНИЯ ПЕРЕНОСА ЭНЕРГИИ И ИНФОРМАЦИИ СКВОЗЬ МАТЕРИАЛ ИЛИ ВЕЩЕСТВО. ЧАСТЬ 5. ФИЗИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЭНЕРГИИ ФЕРМИ 187

Н.А. ОДЕГОВ, А.И. ГУЗУН
ЗАВИСИМОСТЬ ДЛИТЕЛЬНОСТИ И ФОРМЫ ОПТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ОТ НЕРАВНОМЕРНОСТИ КОЭФФИЦИЕНТА ЗАТУХАНИЯ 201

Р.В. ПЕТРОВА, А.И. МОРОЗОВА
ИННОВАЦИОННЫЙ РЕИНЖИНИРИНГ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ В ИНФОРМАЦИОННОЙ СРЕДЕ 211

М.В. ВАСИЛЬКІВСЬКИЙ, Р.П. ПАЛАМАРЧУК
ОЦІНЮВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ ЛІНІЙ ЗВ'ЯЗКУ ЗА КРИТЕРІЄМ КОЕФІЦІЄНТА ПОМИЛОК 216

В.Т. КОНДРАТОВ
ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ МЕТРОЛОГИЯ: БИКОЛЬЦОИДЫ И КОЛЬЦОИДЫ — ПЛОСКИЕ ВЕЩЕСТВЕННЫЕ АЛГЕБРАИЧЕСКИЕ КРИВЫЕ ШЕСТОГО ПОРЯДКА 220

Н.О. КНЯЗЄВА, О.А. КНЯЗЄВ
МЕТОД ОЦІНКИ ТА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТРУКТУРНОЇ ЖИВУЧОСТІ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОЇ МЕРЕЖІ НЕВИЗНАЧЕНОЇ ТОПОЛОГІЇ 232

ОБМІН ПРАКТИЧНИМ ДОСВІДОМ, ТЕХНОЛОГІЯМИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

В.М. КИЧАК, С.М. ЗЛЕПКО, В.І. МАКОГОН
ТЕХНОЛОГІЯ ПСИХОФІЗІОЛОГІЧНОГО ВІДБОРУ ОПЕРАТОРІВ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ 239

О.К. КУЧЕРЕНКО, А.Е. ТОМАШЕВСЬКА
ЗАСТОСУВАННЯ ПІРОМЕТРА СПЕКТРАЛЬНОГО СПІВВІДНОШЕННЯ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ЗНОСУ КОНТАКТНОГО ДРОТУ ЗАЛІЗНИЧНОЇ МЕРЕЖІ 244

Е.Л. ПІРОТТІ, В.Є. КРИВОНОСОВ, Л.Г. КОВАЛЬ, М.І. ПАЛАМАРЧУК
АНАЛІЗ ДЖЕРЕЛ ФАКТОРІВ НЕГАТИВНОГО ВПЛИВУ НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНУ НАДІЙНІСТЬ СИЛОВОГО ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ (СЕТО) (ЗА ДАНИМИ ЛІТЕРАТУРНОГО КОНТЕНТУ) 249

Ю.П. ЗАСПА
КООПЕРАТИВНА ДИНАМІКА, ВЗАЄМОІНДУКЦІЯ, КОМПЛЕКСНА ТОПОЛОГІЯ ТА ГІПЕРКОМПЛЕКСНА ХРОНОЛОГІЯ ВИХОР-ХВИЛЬОВИХ ФОРМ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО, ГРАВІТАЦІЙНОГО, СИЛЬНОГО І СЛАБКОГО, А ТАКОЖ ГІДРОДИНАМІЧНОГО ПОЛІВ ПРОТИ ХИБНИХ СТАНДАРТІВ SM та ΛCDM 254

МАШИНОЗНАВСТВО ТА ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ В МАШИНОБУДУВАННІ

DOI 10.31891/2307-5732-2019-269-1-7-11
УДК 621.01

В.О. ХАРЖЕВСЬКИЙ, М.В. МАРЧЕНКО
Хмельницький національний університет

ВИКОРИСТАННЯ ВАЖІЛЬНИХ МЕХАНІЗМІВ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПЕРІОДИЧНОЇ ЗУПИНКИ ВИХІДНОЇ ЛАНКИ ТА ЇХ ОПТИМІЗАЦІЙНИЙ КІНЕМАТИЧНИЙ СИНТЕЗ

В статті розглядається питання синтезу механізмів для забезпечення періодичної зупинки вихідної ланки під час неперервного обертового руху вхідної ланки. Наведено приклади використання таких механізмів на практиці. Оскільки для цього можуть бути використані важільні механізми, які мають ряд переваг перед іншими типами механізмів, а проблема їх синтезу є досить складною, то розробка методів оптимізаційного кінематичного синтезу таких механізмів є важливою практичною задачею, яка розглядається в роботі. Наведено приклади проведеного синтезу з використанням розробленого програмного забезпечення.

Ключові слова: важільні механізми, кінематичний синтез, оптимізація, напрямні механізми, зупинка вихідної ланки, кінематична геометрія.

V.O. KHARZHEVSKYI, M.V. MARCHENKO
Khmelnytskyi National University

THE USAGE OF LINKAGE MECHANISMS TO PROVIDE THE DWELL OF THE OUTPUT LINK AND THEIR OPTIMIZATION KINEMATIC SYNTHESIS

The paper deals with a problem of designing the mechanisms with a dwell of the output link. For this purpose many types of mechanisms can be used: cam mechanisms, geneva-wheel mechanisms and others. With the defined sizes of the links, this problem can be solved using linkage mechanisms, but the main problem is to conduct their optimization kinematic synthesis. That problem is considered in the article. Several practical examples of dwell linkage mechanisms usage are given in the article. But the problem is to provide the dwell of the output link of the prescribed duration, it is necessary to calculate the lengths of the links; mentioned problem is called kinematic synthesis of mechanisms and it can be solved by means of the kinematic geometry methods. Using these methods, several types of coupler plane's special points can be found. If to set such point as a coupler point of the mechanism, then path generating mechanism and the dwell linkage mechanism on its basis can be synthesized. Obviously, there are many solutions that can be found, so it is important to carry out the optimization procedure. The appropriate software was developed on the basis of Hooke-Jeeves method. Using the developed methods and software, it is possible to find optimal solutions of synthesis problems taking into account a given dwell duration, tolerance, overall dimensions etc., so it enables to satisfy different demands of designers.

Key words: linkage mechanisms, kinematic synthesis, optimization, path generating mechanisms, dwell, kinematic geometry.

В різних галузях машинобудування при проектуванні машин виникає задача забезпечення періодичної зупинки вихідної ланки виконавчого механізму при неперервному обертовому русі вхідної ланки (кривошипа). При цьому часто ставиться задача забезпечення ряду додаткових умов, таких як тривалість та точність зупинки, необхідність узгодження роботи механізму з циклограмою роботи машини, забезпечення мінімальних або наперед заданих габаритних розмірів механізму, його кінематичних та кінетостатичних характеристик. Для забезпечення зупинки вихідної ланки часто використовуються механізми, у склад яких входять вищі кінематичні пари, зокрема кулачкові механізми, які є універсальними за своїми кінематичними характеристиками, мальтійські механізми, зубчасті механізми неповнозубих коліс тощо. Проте відомо, що при певних розмірах ланок, ця задача може бути розв'язана за допомогою важільних механізмів, якщо в основі такого механізму використовувати прямолінійно-напрямний (рис. 1, *а*) або круговий напрямний механізм (рис. 1, *б*). Наявність лише нижчих кінематичних пар у складі таких механізмів забезпечує їх більшу надійність та довговічність, більші робочі швидкості машин та відповідно більшу продуктивність. Зважаючи на наявні переваги, важільні механізми широко впроваджені у сучасному машинобудуванні, проте важливою задачею є проведення їх оптимізаційного кінематичного синтезу за різними критеріями.

Існує три основних напрямки у кінематичному синтезі важільних напрямних механізмів та побудованих на їх основі механізмів із зупинкою вихідної ланки: 1) використання алгебраїчних методів з метою отримання найкращого наближення за Чебишевим: в цьому напрямку варто відмітити, зокрема, роботи Блоха, Кіницького [3], Саркісяна [11], Функа, Гассманна [9]; 2) методи кінематичної геометрії, які започатковані Бурместером та знайшли продовження в роботах Черкудінова, Ліхтенхельдта, Бейера, Іна [12], Уанга [13], а також інших дослідників; 3) оптимізаційний синтез механізмів числовими методами, а також пошук необхідного механізму у створеній базі даних або комп'ютерному атласі механізмів. В цьому напрямку доцільно відмітити, зокрема, роботи Пейсаха, Нестерова, Кікіна [4], Енджелеса. Проте до недоліків використання суто числових методів слід віднести те, що вони не пов'язані з певною аналітичною теорію синтезу механізмів та залежно від властивостей цільової функції можуть забезпечити пошук лише локальних оптимальних варіантів розв'язку поставленої задачі.

Тому метою даної роботи є проведення оптимізаційного синтезу механізмів, причому кінематичний синтез буде проводитись на основі аналітичних методів кінематичної геометрії, з використанням різних особливих точок шатунної площини, що визначають параметри кругових та прямолінійно-напрямних механізмів. Таким чином, межі існування механізмів можуть бути визначені аналітично, а використовуючи методи оптимізації, спрямованим пошуком можна уточнити параметри кінематичної схеми з врахуванням різноманітних вимог конструктора.

На рис. 1 показано приклади механізмів *OABCDE* із зупинкою вихідної ланки *5*, що забезпечується завдяки тому, що шатунна точка *D* базового механізму *OABCD*, за яку прийнята деяка особлива точка шатунної площини *ABD*, описує криву з ділянкою *D′D″* приблизно постійної кривизни, під час проходження якої вихідна ланка *5* буде мати зупинку тривалістю α_Σ, що відповідає куту повороту кривошипа φ_1 за час зупинки.

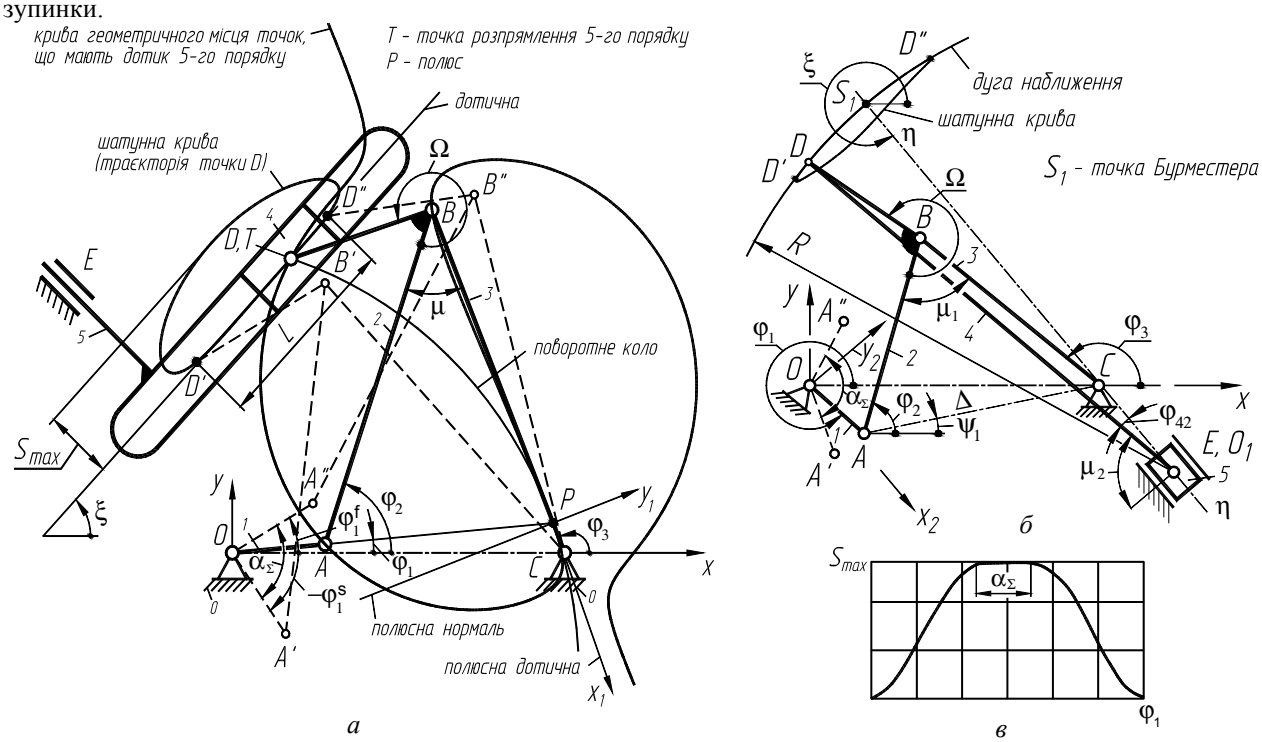
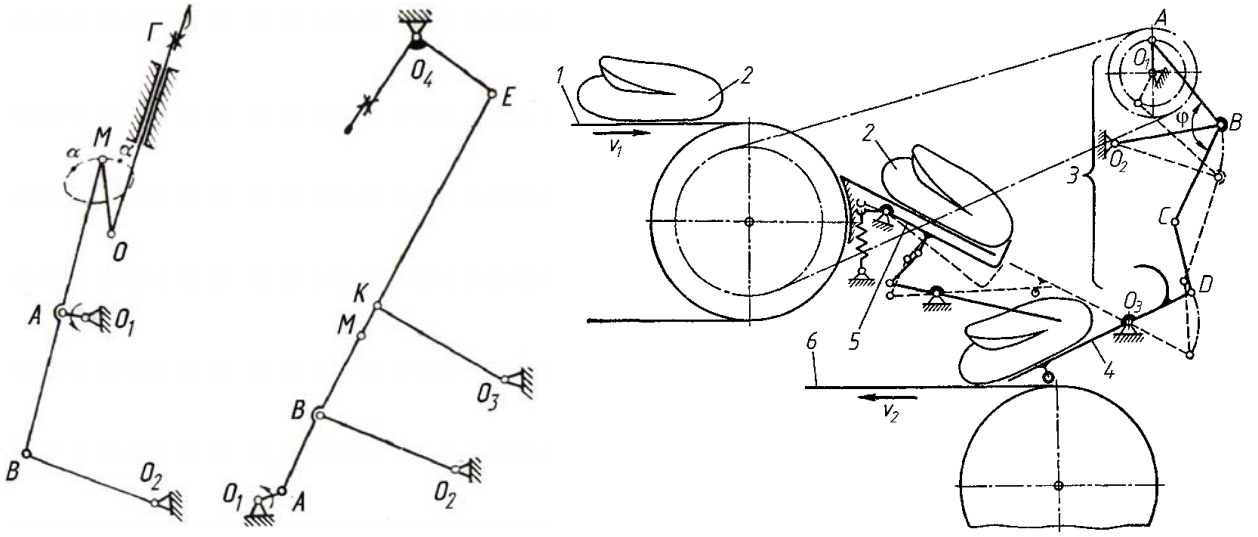


Рис. 1. Важільні шестиланкові механізми, що забезпечують періодичну зупинку вихідної ланки а) на основі прямолінійно-напрямного механізму *OABCD*; б) на основі кругового напрямного механізму *OABCD*; в) приклад діаграми переміщень вихідної ланки механізму

Як показав огляд літературних джерел, шестиланкові важільні механізми часто використовуються як приводні механізми робочих органів технологічних машин та поєднують у собі широкі функціональні можливості при відносно простій конструкції [4]. Зазвичай, такі механізми повинні забезпечувати одну зупинку вихідної ланки, проте існують випадки, коли необхідно забезпечити декілька зупинок. Розглянемо декілька прикладів практичного використання зазначених механізмів у машинах.

Шарнірні механізми основов'язальної машини «Кокетт». В основов'язальних машинах з метою збільшення їх швидкості та продуктивності роботи, часто використовують шарнірно-важільні механізми замість кулачкових. Як зазначено в роботі [1], найскладніша задача у проектуванні шарнірних механізмів полягає у тому, що вони повинні забезпечити зупинки петлеутворювальних органів на певних кутах повороту головного вала машини. В основов'язальній машині «Кокетт» (Німеччина) процес петлеутворення здійснюється за допомогою движкових голок з використанням шарнірних механізмів (рис. 2, *а*, *б*). Причому вказано, що для забезпечення зупинки до $\alpha_\Sigma < 90^\circ$, як правило, використовуються 6-ланкові механізми, а для більш тривалої зупинки число ланок механізму збільшується. Зазначимо, що за допомогою оптимізаційних методів є можливість, за необхідності, значно збільшити тривалість та точність зупинки вихідної ланки.

Зокрема, на рис. 2, *а* показана схема механізму голок, що приводиться в рух від колінчастого вала O_1A, який є кривошипом. До шатуна *AB* механізму в точці *M* шарнірно приєднана ланка *MO*, що приводить у рух голечницю *Г* з голками. Точка *M* на шатуні підбирається таким чином, щоби її траєкторія мала деяку ділянку $\alpha-\alpha$ приблизно постійного радіуса кривизни *R*. Якщо довжину ланки *MO* прийняти рівною радіусу *R*, то голечниця *Г* практично не буде мати вертикального переміщення у верхньому положенні, поки шарнір *M* рухається по ділянці своєї траєкторії $\alpha-\alpha$. За таким самим принципом спроектовані інші механізми машини «Кокетт», що приводять у рух движки голок та вушковини (рис. 2, *б*).



а *б* *в*

Рис. 2. Приклади важільних механізмів із зупинкою вихідної ланки: а, б) шарнірні механізми основов'язальної машини «Кокетт» (Німеччина) [1]; б) перекидач для багатошарових хлібопекарських подових печей [2, 6]

Перекидач для багатошарових хлібопекарських подових печей. На рис. 2, *в* зображено перекидач багатошарових хлібопекарських подових печей [2, 6], який автоматично знімає хлібобулочні вироби *2* зі сталевої стрічки *1* (сітки) конвеєра печі верхнього шару та укладає їх на стрічку *6* (сітку) конвеєра нижнього шару. Перекидач складається з відтинача *5*, захвату *4*, що здійснює коливальний рух і шестиланкового механізму *3*, який забезпечує коливання захвата *4* з тривалою його зупинкою в нижньому положенні та синхронну роботу механізму відтинача. Відтинач *5* і захват *4* розташовані всередині печі, а спарені механізми, що приводять їх у рух, розташовані із зовнішніх сторін печі [2].

Оптимізаційний кінематичний синтез механізмів. Для проведення багатокритеріального оптимізаційного синтезу напрямних механізмів та побудованих на їх основі механізмів із зупинкою вихідної ланки був використаний відомий числовий метод Хука-Дживса, програмна реалізація якого була виконана в роботі [5]. Отже, синтез реалізовано у такій послідовності [6, 8]: 1) попередньо створюються таблиці бази даних з параметрами механізмів, які визначаються методами кінематичної геометрії (при цьому початкові параметри механізмів змінюються з певним кроком в наперед заданих межах); 2) умови синтезу записуються у вигляді нерівностей, вказуються вагові коефіцієнти та вид штрафної функції; 3) проводиться пошук локальних мінімумів у базі даних; 4) реалізується спрямований пошук методом Хука-Дживса.

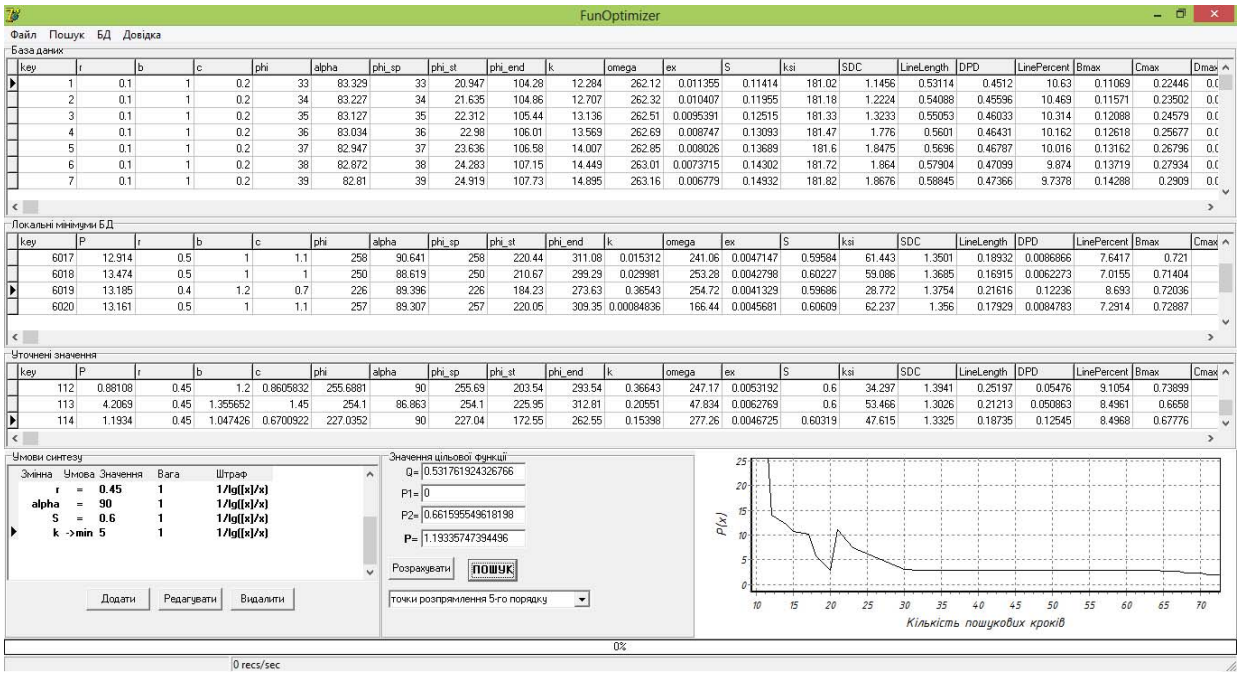


Рис. 3. Головне програмне вікно програмного модуля для проведення оптимізаційного пошуку параметрів механізмів з використання числового методу оптимізації Хука-Дживса

Головне вікно програмного модуля зображено на рис. 3. Причому, як зазначено раніше, в програмі

використовуються попередньо створені таблиці бази даних, які налічують параметри мільйонів механізмів, що синтезовані методами кінематичної геометрії з використанням різних особливих точок шатунної площини.

Синтез проводиться у такій послідовності:

1. Вказуються умови для оптимізації (кнопка «Додати» в групі «Умови синтезу»). При цьому з'явиться діалогове вікно «Умова для оптимізації» (рис. 4), в якому необхідно вказати необхідний параметр, умову та бажане значення. У випадку головної умови вводиться її ваговий коефіцієнт, у випадку бажаної – також вид штрафної функції. Перелік можливих параметрів, які можна оптимізувати, відповідає полям таблиць бази даних, яка була створена в результаті проведеного кінематичного синтезу (див. рис. 3).

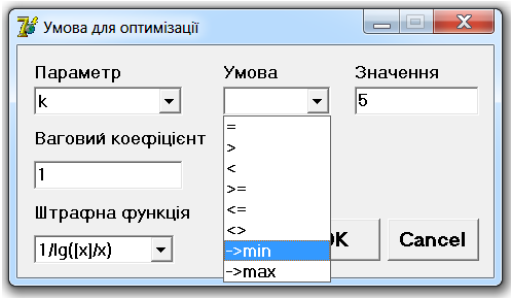


Рис. 4. Умови для оптимізації

2. У списку, що знаходиться в головному вікні, вибирається тип особливих точок, за якими буде проводитись визначення геометричних параметрів. У програмі реалізовано можливість проведення синтезу 4-ланкових кругових та прямолінійно-напрямних механізмів, а також побудованих на їх основі 6-ланкових та 8-ланкових механізмів за точками розпрямлення 5-го порядку [8], точками розпрямлення 4-го порядку [7], точками Бурместера, точками Чебишева, точками Болла, шестикратними вузлами інтерполяції, а також λ-подібних механізмів Чебишева (кругових та прямолінійно-напрямних) [3, 8].

3. Здійснюється пошук локальних мінімумів у базі даних (команда «Файл» – «Пошук локальних мінімумів»). Після завершення процесу пошуку таблиця параметрів у групі «Локальні мінімуми БД» заповниться параметрами відповідних механізмів. Ці механізми будуть прийняті за базові при подальшому проведенні спрямованого пошуку.

4. Спрямований пошук розпочинається шляхом натискання на кнопку «ПОШУК», що розміщена у головному вікні (рис. 3). В процесі проведення розрахунків проводиться мінімізація цільової функції (відповідний графік також розміщений у головному вікні), причому зміну критеріїв, що відповідають за виконання певного типу умов можна спостерігати в реальному часі. Результати оптимізації, а саме значення оптимальних керованих параметрів та критеріїв оптимальності, що їм відповідають, відображаються у відповідних полях вікна програми (рис. 3). Наведемо деякі приклади проведеного оптимізаційного синтезу.

Приклад №1. Спроектувати механізм із зупинкою вихідної ланки на основі прямолінійно-напрямного механізму (див. рис. 1, *а*). Забезпечити умови: $\alpha_\Sigma = 90^\circ$; $S_{\max} = 0,6$; $d = l_{OC} = 1$; $r = l_{OA} = 0,45$. Мінімізувати довжину другого плеча шатуна $k = l_{BD}$. Результати представлені у табл. 1.

Таблиця 1

Особлива точка	№	$r = l_{OA}$	$b = l_{AB}$	$c = l_{BC}$	φ_1	$k = l_{BD}$
Розпрямлення 5-го порядку	1	0,45	1,047426	0,6701	227,0352	0,15398
	2	0,45	1,14	0,6894	261,4213	0,694
Розпрямлення 4-го порядку	1	0,45	1,37054	1,24804	251,07	0,1563

Приклад №2. За допомогою кругового напрямного механізму (див. рис. 1, *б*) забезпечити умови: $\alpha_\Sigma = 120^\circ$; $\Omega = 180^\circ$; $d = l_{OC} = 1; k = l_{BD} = 1,2$. Результати представлені у табл. 2.

Таблиця 2

Особлива точка	№	$r = l_{OA}$	$b = l_{AB}$	$c = l_{BC}$	φ_1
Бурместера	1	0,1	0,618277	0,692915	50,0117
	2	0,1189	1,008863	0,61887	154,76756
	3	0,31	1,201128	1,210426	170,618622

5. Знайдений кут φ_1 визначає положення шатунної площини *ABD* механізму, для якого аналітично відомими методами можна визначити положення відповідних особливих точок та інші розміри ланок. Далі результати проведеного синтезу передаються у програму для проведення кінематичного дослідження, або у систему автоматизованого проектування SOLIDWORKS, де відбувається параметрична перебудова моделі, після чого можна провести визначення всіх інших параметрів механізмів.

Висновки

Важільні механізми мають ряд переваг перед іншими типами механізмів та можуть успішно використовуватись для забезпечення зупинки вихідної ланки заданої тривалості, точності, в тому числі з

врахуванням ряду додаткових критеріїв. За допомогою розробленого програмного забезпечення користувач має можливість проводити багатоваріантні дослідження таких механізмів, які побудовані на основі кругових та прямолінійно-напрямних механізмів, з використанням різноманітних критеріїв, в тому числі враховуючи результати кінематичного дослідження. Дослідження планується продовжити в напрямку оптимізаційного кінематичного синтезу просторових напрямних механізмів та механізмів із зупинкою вихідної ланки.

Література

1. Каценеленбоген А.М. Устройство, работа и обслуживание основовязальных машин / Каценеленбоген А.М., Верховинина Л.Д. – Легкая и пищевая промышленность, 1982. – 304 с.
2. Кожевников С. Н. Механизмы : справ. пособие / С. Н. Кожевников, Я. И. Есипенко, Я. М. Раскин. – М. : Машиностроение, 1976. – 784 с.
3. Киницкий Я.Т. Шарнирные механизмы Чебышева с выстоем выходного звена /Я. Т. Киницкий. – К. : Вища школа, 1990. – 232 с.
4. Кикин А.Б. Разработка методов и средств для структурно-кинематического проектирования рычажных механизмов машин легкой промышленности : дисс. ... докт. техн. Наук : 05.02.13 / А.Б. Кикин ; Санкт-Петербургский государственный университет технологий и дизайна – Санкт-Петербург, 2006. – 362 с.
5. Марченко М.В. Оптимізаційний синтез кривошипно-кулісних механізмів з вистоєм вихідної ланки / М.В. Марченко, О.О. Нікітін // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки – 2008.– № 6, ч. 1 – С. 22–28.
6. Марченко М. В. Кінематичний синтез кривошипно-кулісних механізмів з вистоєм вихідної ланки : дис. … канд. техн. наук : 05.02.02 / М.В. Марченко. – Хмельницький, 2009. – 226 с.
7. Харжевський В. О. Методика синтезу важільних прямолінійно-напрямних механізмів з дотиком 4-го порядку / В.О. Харжевський // Вісник Технологічного університету Поділля. Технічні науки – 2003. – Т. 2. – № 6, ч. 1 – С. 152–163.
8. Харжевський В. О. Теорія синтезу важільних напрямних механізмів та побудованих та їх основі механізмів із зупинкою вихідної ланки : дис. … докт. техн. Наук : 05.02.02 / В.О. Харжевський. – Хмельницький національний університет, 2017. – 522 с.
9. Gassmann V. Synthese von Geradführungen mit ebenen Vierge-lenkgetrieben, Hamburg, Universität der Bundeswehr Diss., 2000. – 102 p.
10. McCarthy J. Geometric Design of Linkages / J. McCarthy. – New York : Springer-Verlag, 2000. – 319 p.
11. Sarkissyan Y.L. Approximations in Synthesis of Mechanisms / Mechanics, Machine Science, Machine-building / State Engineering University of Armenia Proceedings. – 2012. – Issue 15, № 2. – P. 9–21.
12. Yin L. A General Method for Synthesizing Straight-Line Linkage with Ball and Burmester Points / L. Yin, J. Han, J. Huang, T. Yang // Applied Mechanics and Materials. – 2012. – Vol. 215-216. – P. 138–141.
13. Wang D. Kinematic Differential Geometry and Saddle Synthesis of Linkages / Wang D.,Wang W. – John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd., 2015. – 484 p.

References

1. Kacenelenbogen A.M. Ustrojstvo, rabota i obsluzhivanie osnovovjazal'nyh mashin / Kacenelenbogen A.M., Verhovinina L.D. – Legkaja i pishhevaja promyshlennost', 1982. – 304 s.
2. Kozhevnikov S. N. Mehanizmy : sprav. posobie / S. N. Kozhevnikov, Ja. I. Esipenko, Ja. M. Raskin. – M. : Mashinostroenie, 1976. – 784 s.
3. Kinickij Ja.T. Sharnirnye mehanizmy Chebysheva s vystoem vyhodnogo zvena /Ja. T. Kinickij. – K. : Vishha shkola, 1990. – 232 s.
4. Kikin A.B. Razrabotka metodov i sredstv dlja strukturno-kinematicheskogo proektirovanija rychazhnyh mehanizmov mashin legkoj promyshlennosti : diss. ... dokt. tehn. Nauk : 05.02.13 / A.B. Kikin ; Sankt-Peterburgskij gosudarstvennyj universitet tehnologij i dizajna – Sankt-Peterburg, 2006. – 362 s.
5. Marchenko M.V. Optymizatsiinyi syntez kryvoshypno-kulisnykh mekhanizmiv z vystoiem vykhidnoi lanky / M.V. Marchenko, O.O. Nikitin // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2008.– № 6, ch. 1 – S. 22–28.
6. Marchenko M. V. Kinematychnyi syntez kryvoshypno-kulisnykh mekhanizmiv z vystoiem vykhidnoi lanky : dys. … kand. tekhn. nauk : 05.02.02 / M.V. Marchenko. – Khmelnytskyi, 2009. – 226 s.
7. Kharzhevskyi V. O. Metodyka syntezu vazhilnykh priamoliniino-napriamnykh mekhanizmiv z dotykom 4-ho poriadku / V.O. Kharzhevskyi // Visnyk Tekhnolohichnoho universytetu Podillia. Tekhnichni nauky – 2003. – T. 2. – № 6, ch. 1 – S. 152–163.
8. Kharzhevskyi V. O. Teoriia syntezu vazhilnykh napriamnykh mekhanizmiv ta pobudovanykh ta yikh osnovi mekhanizmiv iz zupynkoiu vykhidnoi lanky : dys. … dokt. tekhn. Nauk : 05.02.02 / V.O. Kharzhevskyi. – Khmelnytskyi natsionalnyi universytet, 2017. – 522 s.
9. Gassmann V. Synthese von Geradführungen mit ebenen Vierge-lenkgetrieben, Hamburg, Universität der Bundeswehr Diss., 2000. – 102 p.
10. McCarthy J. Geometric Design of Linkages / J. McCarthy. – New York : Springer-Verlag, 2000. – 319 p.
11. Sarkissyan Y.L. Approximations in Synthesis of Mechanisms / Mechanics, Machine Science, Machine-building / State Engineering University of Armenia Proceedings. – 2012. – Issue 15, № 2. – R. 9–21.
12. Yin L. A General Method for Synthesizing Straight-Line Linkage with Ball and Burmester Points / L. Yin, J. Han, J. Huang, T. Yang // Applied Mechanics and Materials. – 2012. – Vol. 215-216. – R. 138–141.
13. Wang D. Kinematic Differential Geometry and Saddle Synthesis of Linkages / Wang D.,Wang W. – John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd., 2015. – 484 p.

Рецензія/Peer review : 29.01.2019 р. Надрукована/Printed :15.2.2019 р.
Прорецензовано редакційною колегією

DOI 10.31891/2307-5732-2019-269-1-12-16
УДК 621.01

Р.В. АМБАРЦУМЯНЦ, А.П. ЛИПИН, С.А. РОМАШКЕВИЧ
Одесская национальная академия пищевых технологий

КИНЕТОСТАТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ШАРНИРНОЙ ГРУППЫ АССУРА ЧЕТВЕРТОГО КЛАССА ВТОРОГО ПОРЯДКА

Работа посвящена кинетостатическому исследованию шарнирной группы Ассура четвертого класса, второго порядка. Обоснована актуальность такой задачи в свете более широких функциональных возможностей такой группы и отсутствием в учебной, технической и научной литературе простых инженерных методов. Метод базирован на графоаналитическом способе, что более удобно для инженерной практики проектирования. Составлена строгая последовательность проведения отдельных этапов силового исследования с использованием особых точек Ассура. Силовое исследование завершается проверочным построением, позволяющим заключить о правильности расчетных операций и графических построений.

Ключевые слова: кинетостатика, сила, момент силы, составляющие реакции, статическое равновесие, план сил.

R. V. AMBARTSUMYANTS, A. P. LIPIN, S. A. ROMASHKEVICH
Odessa National Academy of Food Technologies

DYNAMIC FORCE RESEARCH OF ASSUR CYLINDRICAL JOINTED GROUP OF THE FOURTH CLASS OF THE SECOND ORDER

Dynamic force analysis of mechanisms is one of the determining stages of their projecting and it allows to carry out calculations for strength and rigidity of elements of the kinematic pairs, units them – selves and prepare the basis for constructing. The work is devoted to dynamic force research of Assur cylindrical jointed group of the fourth class of the second order. The urgency of this task in terms of wider functional possibilities of such group and absence of simple engineering methods in educational, technical and scientific literature, has been substantiated. The method is based on the analytical – tabular method, and that is more comfortable for engineering practice of projecting. The strict sequence of carrying out separate stages of power research with application Assur special dots, has been composed. The force research is completed with verifying construction, which allows to make a conclusion about correctness of calculating operations and graphic plottings. The numerical example was carried out on a personal computer with application of graphic plotting "Compass". It has been established that application of the second sign of accuracy, when determining arms of corresponding forces in the equations of forces moments balance, allows to get the solution practically without errors.

Keywords: dynamic force analysis, force moment, reaction components, static equilibrium, force plan.

Силовое исследование механических конструкций, например, отдельные части мостов, корпусов подъемно-транспортных машин, механизмов преобразования и передачи механического движения до рабочего органа и др., является одним из важнейших этапов на стадии их проектирования. Такое исследование, как правило, предшествует расчетам их деталей на прочность, жесткость или устойчивость, без чего невозможно дальнейшее конструирование данного устройства. Следовательно, разработка простых инженерных методов решения задачи силового исследования механических конструкций, с возможностью проверки правильности результатов исследования, является весьма актуальной задачей в современном машиностроении.

Особое место среди разнообразных механических конструкций занимают механические передачи, обеспечивающие необходимые кинематические и силовые параметры рабочего органа. В последние десятилетия интерес исследователей и проектировщиков резко возрос относительно более сложных (выше второго класса) групп Ассура (по классификации Ассура-Артоболевского) [1], благодаря более широким их функциональным возможностям. Однако, по мере возрастания класса групп Ассура существенно усложняется решение не только задачи их кинематического синтеза и анализа, но и силового исследования. В научной и технической литературе наиболее обстоятельно решены задачи силового исследования группы Ассура второго класса всех модификаций [1, 2 и др.]. В работах авторов [3, 4] разработаны методики силового исследования всех видов модификаций группы Ассура третьего класса третьего порядка, которые, однако, неприменимы для групп более высокого класса. В работе [5] представлен обобщенный метод кинетостатики групп Ассура высоких классов, где доказывается, что статически определимые группы Ассура любого класса сложности со многим числом внешних неизвестных на группе можно привести к такой же системе с тремя неизвестными. Однако, по нашему мнению, метод сложный с точки зрения технического применения на практике.

Целью настоящей работы является разработка простого инженерного метода силового исследования шарнирной группы Ассура четвертого класса второго порядка, с возможностью проверки правильности расчетов и построений, что даст возможность осуществить аналогичные исследования модификаций этой же группы, число которых, без учета изоморфности модификаций, равно 73.

Решение поставленной задачи аналитическим методом можно осуществить составлением системы 12 алгебраических уравнений и её решением. Однако, составление такой системы довольно трудоемко, особенно, если неизвестно начало системы отсчета. Для дальнейшего анализа результатов решений необходимо дополнительно построить годографы реакций связей, что и затрудняет его применение в

инженерной практике.

Решение поставленной в работе задачи осуществим, воспользовавшись особыми точками Ассура.

На рис. 1 представлена расчетная схема рассматриваемой группы (пунктирные линии, кроме звена 2). Здесь же показаны отдельные звенья группы, загруженные внешними силами и реакциями связей (сплошные линии).

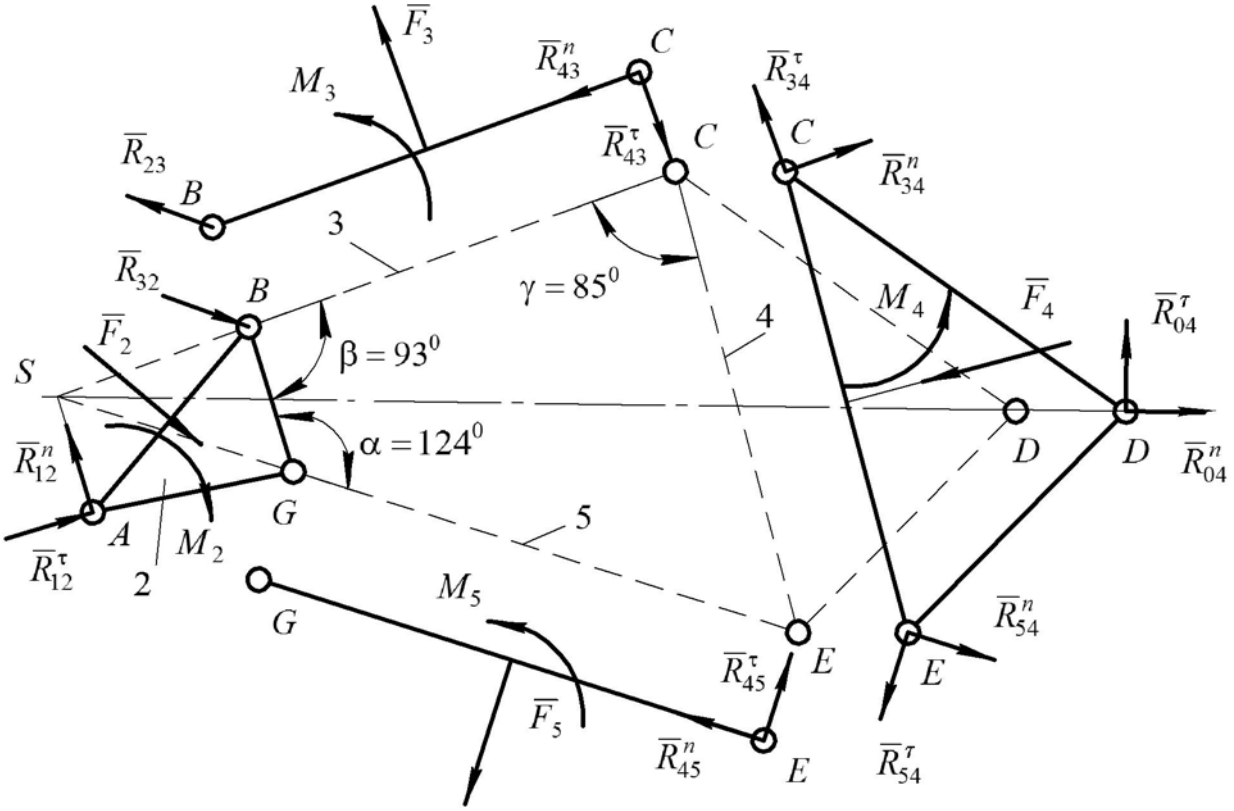


Рис. 1. Расчетная модель силового исследования шарнирной группы Ассура четвертого класса второго порядка

Исходными данными для решения задачи являются:

1) кинематическая схема, положение группы, кинематические показатели ее звеньев;

2) звенья группы загружены равнодействующими силами $\overline{F}_i(i = 2,...,5)$ от внешних сил и сил инерции, равнодействующими моментами $\overline{M}_i(i = 2,...,5)$ от внешних моментов и моментов сил инерции;

3) силы трения не учитываем (в случае необходимости можно воспользоваться известным методом последовательных приближений) [1];

4) звенья группы абсолютно жесткие, зазоры в кинематических парах отсутствуют;

5) продольные оси звеньев 3 и 5 всегда пересекаются и их точка пересечения S (особая точка Ассура) не находится на прямой, проходящей через центры шарнирных соединений A и D.

В шарнирах группы неизвестны модуль и направление реакций и для их нахождения разлагаем на составляющие: в шарнире D – $\overline{R}_{04} = \overline{R}^\tau_{04} + \overline{R}^n_{04}$. Нормальную составляющую $\overline{R}^n_{04}$ направим по прямой DS (рис. 1), а тангенциальную составляющую $\overline{R}^\tau_{04}$ – перпендикулярно к прямой DS; в шарнире A – $\overline{R}_{12} = \overline{R}^\tau_{12} + \overline{R}^n_{12}$. Нормальную составляющую $\overline{R}^n_{12}$ направляем по прямой AS, а тангенциальную составляющую $\overline{R}^\tau_{12}$ – перпендикулярно к прямой AS. Предполагается, что звено 2 соединено с входным звеном 1 механизма, а звено 4 является ведомым и шарнирно соединено со стойкой механизма. Реакции в шарнирах C и E также разложим на составляющие (рис. 1) по продольным осям звеньев 3 и 5 соответственно и в перпендикулярном их направлении. Направление названных векторов выбираем произвольно и в ходе решения задачи их уточняем. Из анализа расчетной модели следует, что на шарнирной группе Ассура четыре неизвестные величины $\overline{R}^n_{12}$, $\overline{R}^\tau_{12}$, $\overline{R}^n_{04}$, $\overline{R}^\tau_{04}$. Для их нахождения поступаем следующим образом. Рассматриваем равновесие звеньев 3 и 5 (рис. 1). Составляем уравнение равновесия моментов сил, действующих на звенья 3 и 5 относительно центров шарниров B и G соответственно. Имеем:

$$\sum M^{(3)}_B(F) = 0\,;\ \sum M^{(5)}_G(F) = 0\,. \qquad (1)$$

Поскольку в каждом из скалярних уравнений (1) только одно неизвестное, то решая их, находим

$\overline{R}_{43}^{\tau}$ и $\overline{R}_{45}^{\tau}$ соответственно.

Рассматриваем равновесие 4-го звена (рис. 1), загружая его реакциями связей и внешними силами. Поскольку $\overline{R}_{34}^{\tau} = -\overline{R}_{43}^{\tau}$, и $\overline{R}_{54}^{\tau} = -\overline{R}_{45}^{\tau}$, то на звено 4 действуют неизвестные силы $\overline{R}_{34}^{n}$, $\overline{R}_{04}^{n}$, $\overline{R}_{54}^{n}$ и $\overline{R}_{04}^{\tau}$. Так как линии действия составляющих $\overline{R}_{34}^{n}$, $\overline{R}_{04}^{n}$, $\overline{R}_{54}^{n}$ проходит через особую точку S Ассура, то составляем уравнение равновесия моментов сил звена 4 относительно точки S

$$\sum M_S^{(4)}(F) = 0; \tag{2}$$

Из выражения (2) находим значение составляющей $\overline{R}_{04}^{\tau}$. Если результат расчета имеет положительный знак, то выбранное предварительно направление силы правильно, в противном случае – направляем вектор в противоположную сторону.

После нахождения составляющей $\overline{R}_{04}^{\tau}$ рассматриваем равновесие всей группы и составляем уравнение равновесия моментов сил относительно т. S (рис. 1). Имеем:

$$\sum M_S^{(гр)}(F) = 0; \tag{3}$$

Так как линии действия неизвестных сил $\overline{R}_{04}^{n}$ и $\overline{R}_{12}^{n}$ проходят через точку S, то из решения скалярного уравнения (3) находим значение составляющей $\overline{R}_{12}^{\tau}$. Полученный при этом знак показывает, как направлен этот вектор.

Таким образом, на группе остаются всего два неизвестных вектора – $\overline{R}_{04}^{n}$ и $\overline{R}_{12}^{n}$. Для их определения составляем векторное уравнение равновесия сил группы

$$\overline{R}_{12}^{n} + \overline{R}_{12}^{\tau} + \overline{F}_2 + \overline{F}_3 + \overline{F}_4 + \overline{F}_5 + \overline{R}_{04}^{\tau} + \overline{R}_{04}^{n} = 0. \tag{4}$$

Решение векторного уравнения (4) целесообразно осуществить графическим методом, т.е. построением плана сил. Из построенного плана сил находим составляющие $\overline{R}_{12}^{n}$, $\overline{R}_{04}^{n}$ и, следовательно, полные реакции $\overline{R}_{12}$ и $\overline{R}_{04}$ в шарнирах A и D.

Из рис. 1 следует, что на звене 4 остались лишь два неизвестных $\overline{R}_{34}^{n}$, $\overline{R}_{54}^{n}$. Составляем векторное уравнение равновесия сил звена 4

$$\overline{R}_{34}^{n} + \overline{R}_{34}^{\tau} + \overline{F}_4 + \overline{R}_{04} + \overline{R}_{54}^{\tau} + \overline{R}_{54}^{n} = 0. \tag{5}$$

На основании (5) строим план сил и находим как значения , так и направления составляющих $\overline{R}_{34}^{n}$ и $\overline{R}_{54}^{n}$ реакций в шарнирах C и E.

Определение реакций в шарнирах B и G уже не представляет никакого труда. Для этого достаточно построить планы сил звеньев 3 и 5, записывая уравнения равновесия сил $\sum \overline{F}^{(3)} = 0$; $\sum \overline{F}^{(5)} = 0$.

Таким образом, во всех шарнирах группы Ассура реакции найдены. Общее число неизвестных величин на группе равно 12-и. Для их нахождения составлены четыре векторных уравнения для сил и четыре алгебраических уравнений моментов, т.е. 12 алгебраических уравнений. Для проверки правильности всех расчетных операций и графических построений рассматриваем равновесие звена 2 поскольку оно ни в одном из 12-ти уравнений не использовалось и записываем для него уравнение равновесия сил и считая, что реакция $\overline{R}_{32}$ или, например, $\overline{R}_{52}^{*}$ неизвестна

$$\overline{R}_{12}^{n} + \overline{R}_{12}^{\tau} + \overline{F}_2 + \overline{R}_{32} + \overline{R}_{52}^{*} = 0. \tag{6}$$

После построения на основании (6) плана сил звена и нахождения $\overline{R}_{52}^{*}$ определяем относительную погрешность по модулю $\Delta_R = \left| R_{52} - R_{52}^{*} \right|$ и по направлению $\Delta\varphi = \left| \varphi_{R_{52}} - \varphi_{R_{52}^{*}} \right|$.

Пример. Определить реакции в шарнирах группы Ассура четвертого класса при заданных параметрах: $(AB) = 32мм$, $(BG) = 20мм$, $(AG) = 27мм$, $(BC) = 60мм$, $(GE) = 70мм$, $(CE) = 63мм$, $(CD) = 55мм$, $(DE) = 41мм$; $\alpha = 124^0$, $\beta = 93^0$, $\gamma = 85^0$, моменты $\overline{M}_i (i = 2,...,5)$, силы $F_2 = F_3 = F_4 = 50H$, $F_5 = 100H$, линия их действия проходит посередине отрезков AB, BC, GE и CE соответственно и перпендикулярно к ним.

Согласно, вышеприведенному использована следующая последовательность решения задачи:

1) по заданным геометрическим параметрам строим положение группы (рис. 2, а) и загружаем внешними силами;

2) определяем реакции $\overline{R}_{45}^{\tau}$, $\overline{R}_{43}^{\tau}$ из решения уравнений (1);

3) определяем реакцию $\overline{R}_{04}^{\tau}$ из решения уравнения (2);

4) определяем реакцию $\overline{R}_{12}^{\tau}$ из решения уравнения (3);

5) строим план сил группы (рис. 2, *б*) и находим реакции $\overline{R}_{12}^{n}$, $\overline{R}_{04}$;

6) строим план сил звена 4 (рис. 2, *в*) и находим реакции $\overline{R}_{34}^{n}$, $\overline{R}_{54}$;

7) строим планы сил звеньев 3 и 5 (рис. 2, *г*, *д*), находим полные реакции $\overline{R}_{23}$, $\overline{R}_{25}$;

8) строим план сил звена 2 (рис. 2, *е*) для проверки расчетов и контроля.

Графические построения и измерение размеров по длине проводим на персональном компьютере, используя «Компас». Измерение проводим с точностью до двух знаков после запятой. Проверка показала, что векторы $\overline{R}_{25} = -\overline{R}_{52}^{*}$ по величине и по направлению полностью совпадают, т.е. погрешность нулевая.

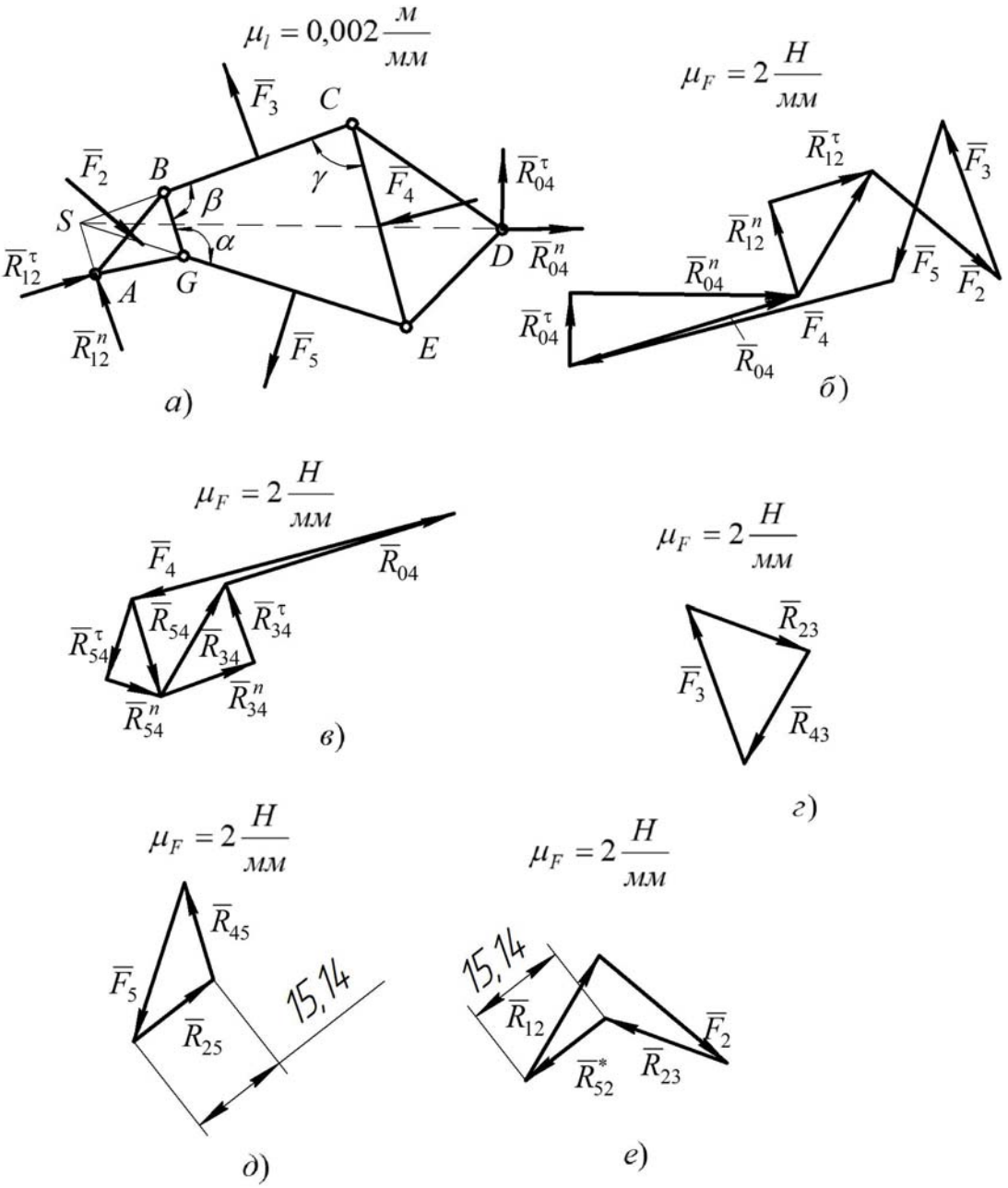


Рис. 2. Расчетное положение шарнирной группы – *а*, планы сил: *б* – группы; *в* – звена 4; *г* – звена 3; *д* – звена 5; *е* – звена 2

Выводы

1. Предложен простой, визуально удобный инженерный метод силового исследования шарнирной группы Ассура четвертого класса, второго порядка.
2. Выполнение силового исследования следует осуществить строго по предложенной последовательности во избежание ошибок.
3. Использование точности измерений расстояний до второго знака после запятой при решении уравнений (1), (2), (3) позволяет получить решение практически без погрешностей.

Литература

1. Артоболевский И.И. Теория механизмов и машин : учеб. для вузов / И.И. Артоболевский. – 4-е изд., перераб. и допол. − М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. литературы, 1988. – 640 с.
2. Левитский Н. И. Теория механизмов и машин / Н. И. Левитский. – М. : Наука, 1990. – 592 с.
3. Амбарцумянц Р. В. Кинетостатика модификаций групп Ассура третьего класса третьего порядка. Часть 1. Модификации с одной и двумя поступательными кинематическими парами / Р.В. Амбарцумянц, С.А. Ромашкевич // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2017. – № 4. – С. 45–51.
4. Амбарцумянц Р. В. Кинетостатика модификаций групп Ассура третьего класса третьего порядка. Часть 2. Модификация с тремя и четырьмя поступательными кинематическими парами / Р.В. Амбарцумянц, С.А. Ромашкевич // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2018. – № 1. – С. 218–223.
5. Амбарцумянц Р.В. Обобщенный метод кинетостатики сложных плоских кинематических групп / Р.В. Амбарцумянц // Теория механизмов и машин. – Харьков, 1973. – № 14. – С. 49–52.

References

1. Artobolevskij I.I. Teorija mehanizmov i mashin : ucheb. dlja vuzov / I.I. Artobolevskij. – 4-e izd., pererab. i dopol. − M. : Nauka. Gl. red. fiz.-mat. literatury, 1988. – 640 s.
2. Levitskij N. I. Teorija mehanizmov i mashin / N. I. Levitskij. – M. : Nauka, 1990. – 592 s.
3. Ambarcumjanc R. V. Kinetostatika modifikacij grupp Assura tret'ego klassa tret'ego porjadka. Chast' 1. Modifikacii s odnoj i dvumja postupatel'nymi kinematicheskimi parami / R.V. Ambarcumjanc, S.A. Romashkevich // Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences. – 2017. – № 4. – S. 45–51.
4. Ambarcumjanc R. V. Kinetostatika modifikacij grupp Assura tret'ego klassa tret'ego porjadka. Chast' 2. Modifikacija s tremja i chetyr'mja postupatel'nymi kinematicheskimi parami / R.V. Ambarcumjanc, S.A. Romashkevich // Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences. – 2018. – № 1. – S. 218–223.
5. Ambarcumjanc R.V. Obobshhennyj metod kinetostatiki slozhnyh ploskih kinematicheskih grupp / R.V. Ambarcumjanc // Teorija mehanizmov i mashin. – Har'kov, 1973. – № 14. – S. 49–52.

Рецензія/Peer review : 30.10.2018 р. Надрукована/Printed :15.2.2019 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Гладушняк А.К.

DOI 10.31891/2307-5732-2019-269-1-17-19
УДК 621.961

О.С. ПОЛІЩУК
Хмельницький національний університет

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ РІЗАННЯ ВЗУТТЄВИХ МАТЕРІАЛІВ

В даній статті проводиться експериментальне дослідження процесу різання взуттєвих матеріалів в статичному та динамічному режимах.

Ключові слова: легка промисловість, швейні та взуттєві матеріали, різання, швидкість різання, чистота зрізу.

O.S. POLISHCHUK
Khmelnytskyi National University

EXPERIMENTAL STUDY OF THE PROCESS OF CUTTING SHOE MATERIALS

Interaction of an edge with visco-elastic material, in the course of its cutting, is characterized extremely difficult, mainly physical, by the phenomena. These phenomena are not subject to a clear analytical description. Only a combination of theoretical foundations with experimental studies will give an understanding of the true physical nature of this process. It will make important, in the applied relation, conclusions. Research on cutting materials in the footwear and clothing industry was conducted in a static mode by many scientists. At present, there is practically no study of cutting materials in a dynamic mode. To date, thanks to the development of measuring techniques, the opportunity to more accurately determine the parameters of the cutting process of materials. Using digital microscopes and high-speed video recording, you can record the process of immersing a working body into a material. Experimental installations were developed to investigate the operation of cutting footwear and sewing materials in static and dynamic regimes. For the experiment, samples of shoe materials with different physical and mechanical properties were selected. A study was carried out on the process of cutting shoe and sewing materials in different modes. The obtained results of experimental studies made it possible to draw the following conclusions. It was experimentally established dependence of the general work of cutting and preliminary compression of material on cutting speed in the range of various speeds. Dynamic cutting compared to static, can be characterized by the appearance of additional factors: an increase in the difference between the speed of applying the load from the side of the blade and the rate of distribution of deformations in the material; reduction of dry frictional force; increase of "inertia support" layers of material; a significant reduction in the cutting angle and so on. The growth rate of the useful work of the cutter blade has been experimentally determined and, accordingly, the reduction of the cutting force and the overall cutting performance with increasing cutting speed. Most footwear and sewing fibrous materials are anisotropic materials with different mechanical properties in different directions. One way to reduce anisotropic properties is to seal the material during the cutting operation. To assess the process of destruction and, in particular, cutting of visco-elastic materials, especially fibrous, the essential indicator is the cleanliness of the cut. In the course of experimental studies, the relationship between the cutting speed and the cutoff is established. As the cutting speed increases, the cut cleanliness improves.

Key words: light industry, shoe material, cutting, cutting speed, cutting cleanliness.

Вступ

Взаємодія леза з в’язко-пружним матеріалом, в процесі його різання, характеризується надзвичайно складними, головним чином фізичними, явищами, які не піддаються чіткому аналітичному опису. Тільки поєднання теоретичних основ з експериментальними дослідженнями дасть розуміння справжньої фізичної сутності цього процесу та дозволить зробити важливі, в прикладному відношенні, висновки. В багатьох випадках, задача теоретичного дослідження спрощується прийнятими припущенням для того щоб визначити основні величини, якими описується технологічний процес. Експериментальні дослідження, які проводяться для підтвердження адекватності теоретичних тверджень, показують, наскільки значуща похибка отриманих результатів, обумовлена прийнятим припущенням, і відповідно, в якому напрямку повинна бути скоректовані теоретичні дослідження.

Постановка проблеми

Експериментальні дослідження процесу різання матеріалу проводяться для виявлення закономірностей, що представляють інтерес з точки зору існуючих теоретичних досліджень та їх прикладного використання.

Існують різні експериментальні методи та пристрої, що використовуються в сучасній експериментальній практиці для дослідження процесу різання матеріалів в різних галузях, зокрема: металів – в машинобудуванні; різних порід дерева – в деревообробній промисловості, стебел рослин – в сільському господарстві; овочів – в харчовій промисловості тощо. Дослідження різання матеріалів у взуттєвій та швейній промисловості проводилися в статичному режимі багатьма вченими. Наразі, практично відсутні дослідження різання матеріалів в динамічному режимі.

На сьогоднішній день, завдяки розвитку вимірювальної техніки, з’явилася можливість більш точно визначати параметри процесу різання матеріалу. За допомогою цифрових мікроскопів та надшвидкісної відеозйомки можна записати процес занурення робочого органу в матеріал.

Метою статті є експериментальне дослідження процесу різання взуттєвих матеріалів в статичному та динамічному режимах.

Виклад основного матеріалу

Роботу попереднього стискання шару можна виразити залежністю [1]:

$$A_{cm} = E_{cm} \cdot \frac{t_{cm}}{t}, \quad (1)$$

де E_{cm} – модуль стискання матеріалу лезом, що має розмірність роботи (за В.П. Горячкіним); t_{cm} – величина стискання матеріалу; t – товщина матеріалу.

Робота A_{cm} може бути визначена як площа першої дільниці діаграми різання (рис. 3). З незначною похибкою вона дорівнює площі трикутника ΔABF з основою t_{cm} і висотою $F_{кр}$. Величина сили стискання, при якій закінчується стискання матеріалу лезом і починається його занурення в матеріал, називається критичною стискаючою силою леза $F_{кр}$. Таким чином:

$$A_{cm} = \frac{F_{кр}}{2} \cdot t_{cm}. \quad (2)$$

Прирівнявши вирази (1) і (2), можна визначити значення критичної стискаючої сили $F_{кр}$, за якої починається різання:

$$F_{кр} = \frac{2 \cdot E_{cm}}{t}, \quad (3)$$

і значення модуля стискання матеріалу лезом:

$$E_{cm} = t \cdot \frac{F_{кр}}{2}. \quad (4)$$

Відповідно формули (4) і рис. 3 модуль стискання рівний площі трикутника ΔABF, основою якого є товщина матеріалу t, а висотою – критична сила стискання $F_{кр}$. Вираз (4) дозволяє експериментально визначити модуль стискання матеріалу лезом робочого інструменту.

Відношення критичної сили $F_{кр}$ до величини стискання t_{cm} представляє собою тангенс кута θ нахилу гіпотенузи трикутника ΔABF на діаграмі стискання:

$$\eta_{on} = tg\theta = \frac{P_{кр}}{t_{cm}}. \quad (5)$$

Величину η_{on} можна назвати коефіцієнтом опору шару стисканню лезом до початку різання.

Відношення корисної роботи різання $A_{різ}$ до всієї роботи A, що затрачається при різанні, є коефіцієнтом корисної роботи леза λ:

$$\lambda = \frac{A_{різ}}{A_{різ} + A_{cm}}. \quad (6)$$

Роботу $A_{різ}$ з несуттєвою похибкою можна визначити із діаграми різання (рис. 3) як площу прямокутника CDEF з основою t–t_{cm} і висотою $F_{різ.сер.}$, що представляє собою середнє значення зусилля на дільниці різання:

$$A_{різ} = F_{різ}(t - t_{cm}). \quad (7)$$

Підставляючи значення A_{cm} із формули (4) і $A_{різ}$ із формули (7) у вираз (6) отримаємо:

$$\lambda = \frac{P_{різ}(t - t_{cm})}{\frac{F_{кр}}{2} t_{cm} + F_{різ}(t - t_{cm})}. \quad (8)$$

Так як при різанні матеріалів легкої промисловості завжди має місце його попереднє стискання лезом, то коефіцієнт λ буде менше одиниці. Збільшення цього коефіцієнту характеризує поліпшення процесу різання, так як загальна робота A, що затрачається на процес попереднього стискання і різання, на основі виразу (6) буде визначена:

$$A = A_{cm} + A_{різ} = \frac{A_{різ}}{\lambda}. \quad (9)$$

Аналіз формули показує, що робота A зі збільшенням λ зменшується.

В якості енергетичної оцінки процесу різання, що характеризує його енергоємність, був вибраний найбільш важливий і такий, що легко співставляється для різних умов експерименту показник – питома робота різання $A_{пит}$, яку можна визначити за формулою:

$$A_{пит} = \frac{A}{F_{зр}} = \frac{A}{b_{зр} \cdot t}, \quad (10)$$

де $F_{зр}$ – площа перерізу зразка матеріалу, що розрізається лезом різака; $b_{зр}$ – ширина зразка матеріалу.

У формулі (8) зазначено дві величини сили різання – $F_{різ}$ і $F_{кр}$. Залежно від різання конкретних взуттєвих матеріалів в експериментах можуть бути висунуті такі умови:

$$F_{крит} > F_{різ}; \quad F_{крит} = F_{різ}; \quad F_{крит} < F_{різ}. \quad (10)$$

Тому з незначною похибкою, і тим більше, якщо процес різання відбувається в динамічному режимі, можна прийняти, що:

$$F_{крит} = F_{різ} = F_{різ.сер.} \tag{11}$$

Тоді загальна робота A різання матеріалу у відповідності з виразами (2), (7) і (9) може бути представлена у вигляді:

$$A = A_{ст} + A_{різ} = F_{різ.сер.} \cdot \frac{t_{ст}}{2} + F_{різ.сер.} \cdot \left(t - t_{ст}\right) = F_{різ.сер.} \cdot \left(t - \frac{t_{ст}}{2}\right). \tag{12}$$

Таким чином, знаючи товщину матеріалу t, визначивши експериментальним шляхом величини $t_{ст}$, $F_{різ.сер.}$ та A можна знайти коефіцієнт корисної роботи леза λ на основі формул (7) та (9):

$$\lambda = \frac{F_{різ.сер.}\left(t - t_{ст}\right)}{A}. \tag{13}$$

Результат роботи

Для дослідження операції вирубування взуттєвих та швейних матеріалів у статичному режимі, було розроблено експериментальну установку (рис. 1). До складу експериментальної установки входить: пристрій для виконання операції вирубування 1; блок вимірювальної апаратури 2; цифровий мікроскоп 3; комп'ютер 4. Пристрій для виконання операції вирубування складається з: рами 1, гвинтової пари для створення навантаження 2, різака 3, матеріалу 4 (рис. 2).

Блок вимірювальної апаратури складається з: тензометричної балки 5 для визначення зусилля вирубування, тензометричної балки 6 для визначення величини занурення різака в матеріал, підсилювача, аналогово-цифрового перетворювача (АЦП) та комп'ютера.

Рис. 1. Установка для дослідження операції вирубування взуттєвих матеріалів в статичному режимі

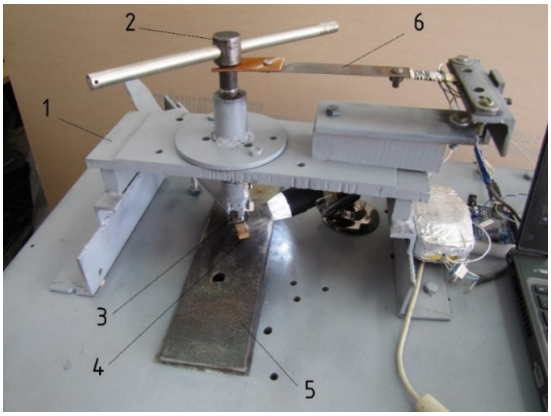


Рис. 2. Пристрій для виконання операції вирубування в статичному режимі

Для запису процесу занурення різака в матеріал використовується USB цифровий мікроскоп 2 (рис. 1).

Установка для дослідження операції вирубування взуттєвих матеріалів, в статичному режимі, працює наступним чином. Взуттєвий матеріал, визначених параметрів, встановлюється на тензометричну балку 5 (рис. 2). За допомогою гвинтової пари 2 створюється необхідне зусилля різання матеріалу 4. Ніж 3, занурюючись у матеріал 4, прорізає його. Аналогові сигнали, що виникають в тензометричних балках 5 і 6, підсилюються за допомогою підсилювача, перетворюються в цифрові за допомогою АЦП та поступають на комп'ютер. За допомогою розробленого програмного забезпечення, встановленого на комп'ютері, отримується залежність технологічного зусилля вирубування від величини занурення різака у матеріал. За отриманими залежностями в подальшому можна визначати параметри процесу вирубування матеріалу. Одночасно, за допомогою USB цифрового мікроскопа записувався у файл процес занурення різака в матеріал.

Для проведення експерименту було вибрано зразки взуттєвих матеріалів з різними фізико-механічними властивостями: натуральну шкіру низу; натуральну шкіру верху; замшу; взуттєвий картон і гуму для підошов монолітну. У всіх проведених дослідах ширина матеріалів, що піддавалися процесу різання була однакова і складала 15 мм.

Для вирубування використовувався прямолінійний різак з кутом загострення 25 °, без притуплення.

Для кожного із матеріалів проводилося по п'ять дослідів. Отримані результати дослідження наведені в табл. 1. Зразки матеріалів в табл. 1 розміщені під номерами: 1 – натуральна шкіра низу; 2 – натуральна шкіра верху; 3 – замша; 4 – взуттєвий картон; 5 – гума для підошов монолітна. Приклад діаграми різання натуральної шкіри низу взуття представлено на рис. 3.

Отриману діаграму різання можна розділити на дві характерних дільниці, що відповідають різним стадіям процесу: стискання шару матеріалу лезом до тиску достатнього для проникнення леза в товщину (попереднє стискання); рух леза крізь матеріал (різання).

Робота, що витрачається на кожну із вказаних стадій з невеликою похибкою, характеризується відповідною площею $A_{ст}$ (ΔABF) і $A_{різ}$ (αCDEF) (рис. 3) діаграми різання. З точки зору потрібного ефекту корисною слід вважати тільки ту роботу, яка витрачається безпосередньо на різання $A_{різ}$, і не корисною, хоч і

невідворотною, – роботу попереднього стискання матеріалу $A_{ст}$.

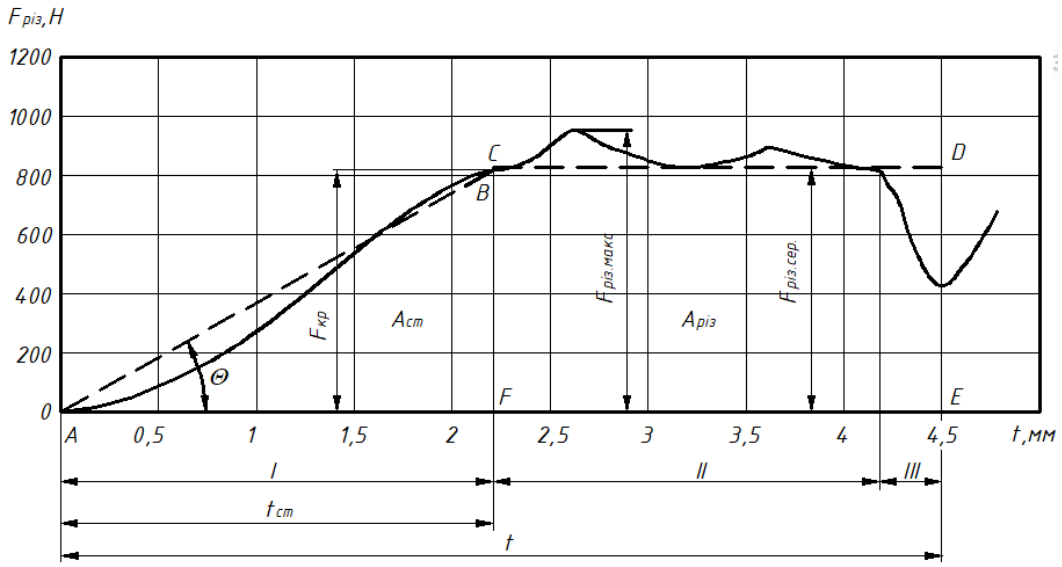


Рис. 3. Діаграма різання натуральної шкіри низу взуття в статичному режимі

Таблиця 1

Експериментальні та розрахункові дані різання взуттєвих матеріалів в статичному режимі

№ з/п	Показник	Матеріал				
		1	2	3	4	5
1	Товщина матеріалу t, мм	4,5	1,5	1,54	2,0	2,0
2	Величина стискання $t_{ст}$, мм	2,2	1,22	1,05	1,65	1,8
3	Критична сила $F_{кр}$, Н	810	1325	1400	1390	300
4	Робота, Н·м – стискання $A_{ст}$ – різання $A_{різ}$ – загальна A	 0,89 1,96 2,85	 0,64 0,37 1,01	 0,97 0,7 1,67	 0,65 0,49 1,14	 0,12 0,06 0,18
5	Коефіцієнт λ корисної роботи різання	0,68	0,58	0,42	0,43	0,33
6	Модуль стискання $E_{ст}$	1,82	1,04	1,85	0,2	0,07
7	Площа $S_{зр}$ перерізу матеріалу, см^2	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68
8	Питома робота, Н·м/см^2 – загальна $A_{пит}$ – різання $A_{різ.пит}$ – стискання $A_{ст.пит}$	 4,19 2,89 1,30	 1,49 0,54 0.95	 2,46 1,03 1,43	 1,68 0,72 0,96	 0,265 0,088 0,177

Аналіз діаграми різання натуральної шкіри низу взуття в статичному режимі показав, що процес різання відбувається у три етапи: *I* – вдавлювання робочого інструменту (різака) в матеріал, тобто етап стискання матеріалу; *II* – занурення різака в матеріал; *III* – розсовування матеріалу після розриву. Для деяких матеріалів, особливо однорідних за структурою, даний етап може бути відсутнім. Етап розсовування матеріалу можна віднести до етапу різання матеріалу, в зв'язку з тим, що на даному етапі відбується ще дорізування не зруйнованих волокон, і сам процес розсовування теж потребує певних витрат енергії.

На рис. 4 представлено характерні діаграми різання для інших вибраних матеріалів різної товщини (t=1,5 – 2 мм).

Штрихова лінія на рис. 4 показує кінець етапу стискання матеріалу і початок його різання різаком. З отриманих діаграм видно, що для різних матеріалів площа дільниці стискання різна. На величину площі мають вплив фізико-механічні властивості матеріалу.

На діаграмах різання (рис. 3, 4) ординати на дільниці попереднього стискання виражають величину тиску ножа на матеріал, на дільниці різання – величину сили різання. Відсутність плавності кривої на першій дільниці вказує на нерівномірність деформації матеріалу. На дільниці різання нерівномірність сили різання, особливо для неоднорідних матеріалів обумовлена анізотропними властивостями матеріалу. Особливо це видно по руйнуванню натуральної шкіри низу взуття (рис. 3). Точка В абсциси характеризує момент закінчення стискання і початку різання матеріалу. Вона розділяє абсцису на дві частини: $t_{ст}$, що представляє собою величину практично лінійного стискання шару першочергової товщини матеріалу t і t–$t_{ст}$, що представляє собою товщину шару матеріалу, що ущільнений лезом в момент початку різання.

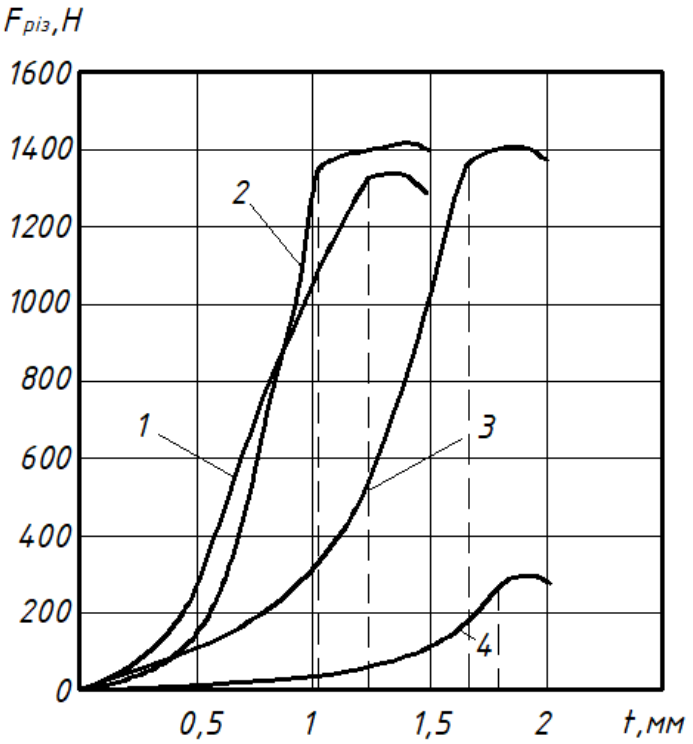


Рис. 4. Діаграми різання матеріалів в статичному режимі: 1 – натуральна шкіра верху; 2 – замша; 3 – взуттєвий картон; 4 – гума для підошов

З отриманих діаграм різання взуттєвих матеріалів було визначено величину стискання матеріалу $t_{ст}$, критичну силу $F_{кр}$ та силу різання $F_{різ}$, роботу стискання $A_{ст}$, роботу різання $A_{різ}$. Загальна робота A, коефіцієнт корисної дії леза робочого інструменту λ, модуль стискання $E_{ст}$, загальна питома робота $A_{пит}$, питома робота стискання $A_{ст.пит.}$ та питома робота різання $A_{різ.пит.}$ визначалися на основі вище приведених формул. Отримані результати приведені в табл. 1.

На рис. 5 проілюстровані відзняті кадри поетапного занурення різака в матеріал в статичному режимі в натуральну шкіру низу взуття і взуттєвий картон.

Аналіз відзнятих кадрів занурення різака у використані в експерименті матеріали, підтвердив, що етап стискання матеріалу робочим інструментом є суттєвим та в деяких випадках, наприклад для гуми складає до 85 %. Також було підтверджено наявність етапу розсовування матеріалу після розриву в результаті якого отримується не якісний зріз матеріалу.

Для дослідження операції різання взуттєвих матеріалів у динамічному режимі, було розроблено експериментальну установку. До складу експериментальної установки входить: пристрій для виконання операції різання; блок вимірювальної апаратури; високошвидкісна камера; комп'ютер.

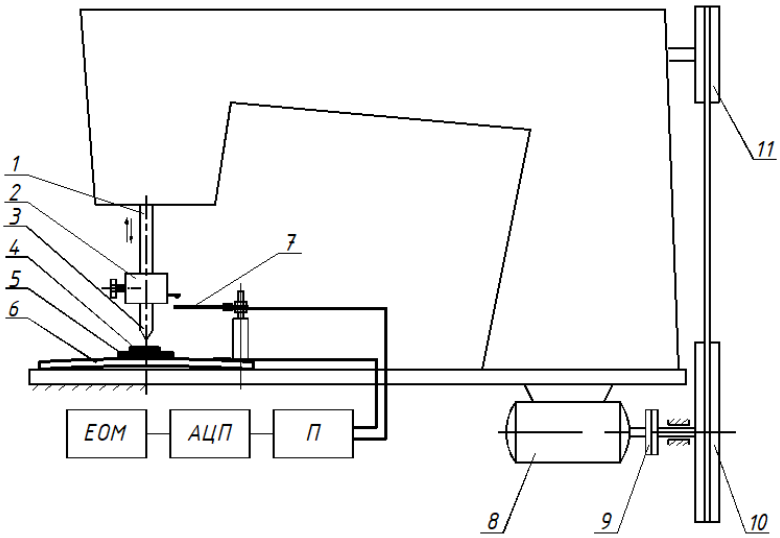
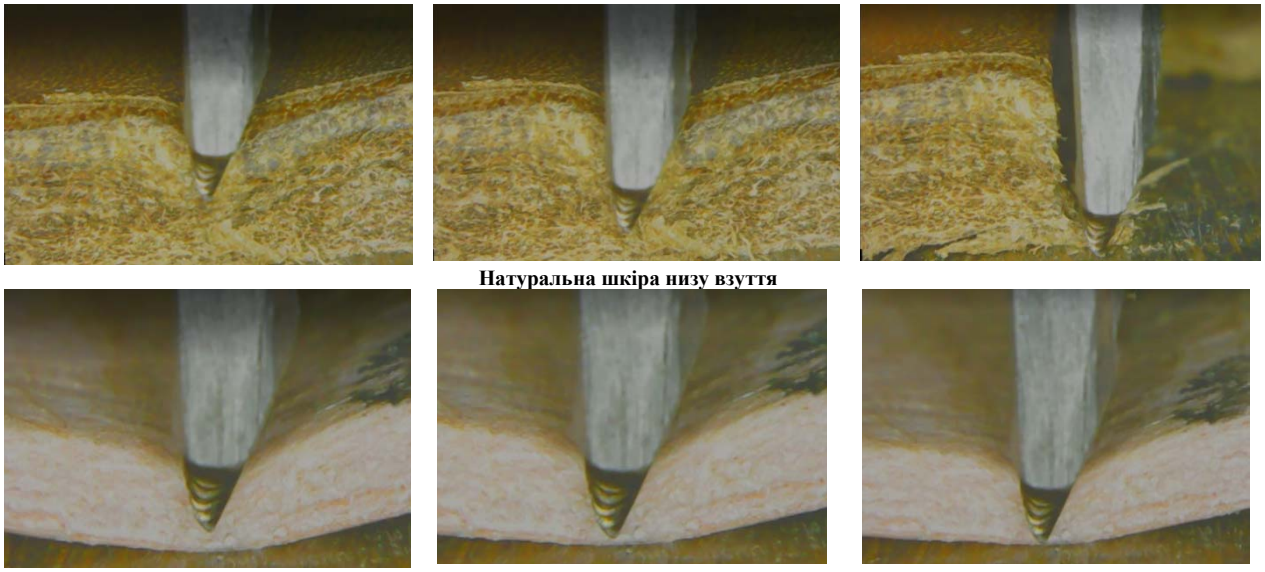


Рис. 6. Експериментальна установка для визначення сили різання в динамічному режимі: 1 – голководій; 2 – тримач; 3 – різак; 4 – матеріал; 5 – вирубна плита; 6 – тензометрична балка для вимірювання сили різання; 7 – тензометрична балка для вимірювання величини занурення різака в матеріал; 8 – електричний двигун; 9 – муфта; 10 – пасова передача; 11 – махове колесо

Пристрій для виконання операції різання складається із головки швейної машини з електромеханічним приводом (рис. 6). Для підвищення ефективності процесу різання в машині були відключені механізми переміщення матеріалу та човника, а також знято притискний ролик. До голководія 1 було прикріплено тримач 2 в якому закріплено різак 3 для різання матеріалу. Матеріал 4, який використовується для вирубування, вкладається на вирубну плиту 5.

Блок вимірювальної апаратури складається з: тензометричної балки для визначення зусилля вирубування 6, тензометричної балки для визначення величини занурення різака в матеріал 7, підсилювача, аналогово-цифрового перетворювача та комп'ютера.



а **б** **в**

Рис. 5 Етапи занурення різака в матеріал: а – стискання; б – різання; в – розсовування нижнього шару

Дана експериментальна установка дозволяє провести виконання операції різання матеріалу в динамічному режимі на швидкостях від 1 до 4 м/с. Для запису процесу занурення різака в матеріал на зазначених швидкостях використовується камера, що дозволяє здійснювати надшвидкісну відеозйомку. За допомогою наявної в камері функції «супер уповільнений рух» є можливість переглядати відзняте відео покадрово та зберігати необхідні кадри.

При проведені експериментальних досліджень відеозйомка здійснювалася в площині, перпендикулярній до кромки леза і співпадаючої з торцем матеріалу. Це дозволило досить точно прослідкувати за процесом занурення леза різака в матеріал і знайти момент закінчення стикання шару і початку його руйнування під кромкою леза.

Установка для дослідження операції вирубування взуттєвих матеріалів, в динамічному режимі, працює наступним чином. Взуттєвий матеріал 4, визначених параметрів, встановлюється на вирубну плиту, яка в свою чергу розміщується на тензометричній балці 6. За допомогою електричного двигуна 8, через фрикційну муфту 9, пасову передачу 10 та махове колесо 11, приводиться в рух головний вал швейної машини. Він, в свою чергу через кривошипно-повзунний механізм приводить в дію голководій із закріпленим різаком. Таким чином, за рахунок крутного моменту електричного двигуна 8 створюється необхідне зусилля різання $F_{різ}$ зразка матеріалу. Передударна швидкість різання матеріалу різаком розраховується теоретичним шляхом, виходячи із частоти обертання головного валу швейної машини. Взуттєвий матеріал 4, що досліджується, встановлюється на тензометричну балку 6. Далі різак 3, занурюючись у матеріал 4, прорізує його. Аналогові сигнали, що виникають в тензометричних балках 6 і 7, підсилюються за допомогою підсилювача, перетворюються в цифрові за допомогою АЦП та надходять на комп'ютер. За отриманими експериментальними даними, за допомогою розробленого програмного забезпечення, встановленого на комп'ютері, в подальшому будується графік залежності сили різання $F_{різ}$ від величини занурення різака в матеріал t.

Одночасно, за допомогою камери у файл записується процес занурення різака в матеріал. Покадровий перегляд відзнятого процесу та його збільшення за допомогою наявної в камері функції наближення, дозволяє також визначити момент закінчення етапу стискання та початок етапу різання матеріалу та визначити, за допомогою вимірювальних приладів, величину стискання матеріалу $t_{ст}$. Це дало змогу перевірити правильність даних отриманих із діаграми різання.

В зв'язку зі складністю проведення даного експерименту в динамічному режимі для матеріалів, що мають малу товщину, дослідженню піддавалася натуральна шкіра низу взуття, товщина якої була 4,5 мм. При проведенні даного експерименту використовувався той самий різак з тим ж параметрами, що і при проведені експерименту в статичному режимі. Для даного матеріалу проводилося 15 дослідів. Така велика

кількість дослідів дала змогу відтворити реальну картину швидкісного різання матеріалу різаком.

В подальшому, змінюючи частоту обертання головного валу швейної машини, змінювали передударну швидкість робочого інструменту та повторювали експеримент для того ж самого матеріалу. Отримані дані різання натуральної шкіри низу взуття в динамічному режимі приведені в табл. 2.

Отриману діаграму різання натуральної шкіри низу взуття також, як і при статичному режимі, можна розділити на дві характерних дільниці, що відповідають різним стадіям процесу. Робота, що витрачається на кожну із двох стадій, характеризується відповідними площами $A_{ст}$ (ΔABF) і $A_{різ}$ (αBDEF) (рис. 7) діаграми різання. Як показує дана діаграма, при динамічному різанні матеріалів відсутній етап розсовування нижнього шару матеріалу. Тобто процес різання відбувається до самого кінця. Ретельний аналіз, отриманих за допомогою відеозйомки кадрів занурення леза різака в матеріал при швидкостях 1–4 м/с, показав наявність в кінці різання зони матеріалу, який практично не деформується. Це і пояснює те, що при швидкісному різанні відсутній етап розсовування матеріалу і матеріал ріжеться без розриву до кінця.

З отриманих діаграм різання взуттєвих матеріалів в динамічному режимі було визначено величину стискання матеріалу $t_{ст}$, силу різання $F_{різ.сер.}$, роботу стискання $A_{ст}$, роботу різання $A_{різ}$. Загальна робота A, коефіцієнт корисної дії леза робочого інструменту λ, загальна питома робота $A_{пит}$, питома робота стискання $A_{ст.пит.}$ та питома робота різання $A_{різ.пит.}$ визначалися за відповідними формулами.

Таблиця 2

Експериментальні та розрахункові дані різання натуральної шкіри низу взуття в динамічному режимі

№ з/п	Показник	Швидкість різання, м/с							
		0,5	1	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
1	Величина стискання $t_{ст}$, мм	1,39	1,3	1,2	1,12	1,08	1,04	0,95	0,9
2	Сила різання, $F_{різ.сер.}$, Н	494	500	518	533	540	561	577	610
3	Робота, Н·м – стискання $A_{ст}$ – різання $A_{різ}$ – загальна A	 0,7 1,9 2,6	 0,5 1,87 2,37	 0,4 1,86 2,26	 0,32 1,83 2,15	 0,3 1,82 2,12	 0,25 1,815 2,06	 0,21 1,81 2,02	 0,2 1,8 2,0
4	Коефіцієнт корисної роботи різання λ	0,73	0,78	0,82	0,85	0,86	0,87	0,88	0,89
5	Площа перерізу матеріалу $S_{зр}$, см^2	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68
	Питома робота, Н·м/см^2 – загальна $A_{пит}$ – різання $A_{різ.пит}$ – стискання $A_{ст.пит}$	 3,82 2,79 1,03	 3,48 2,75 0,73	 3,32 2,74 0,58	 3,16 2,69 0,47	 3,12 2,68 0,44	 3,03 2,67 0,36	 2,97 2,66 0,31	 2,94 2,65 0,29

Приклад діаграми різання натуральної шкіри низу взуття в динамічному режимі при швидкості 3 м/с наведено на рис. 7.

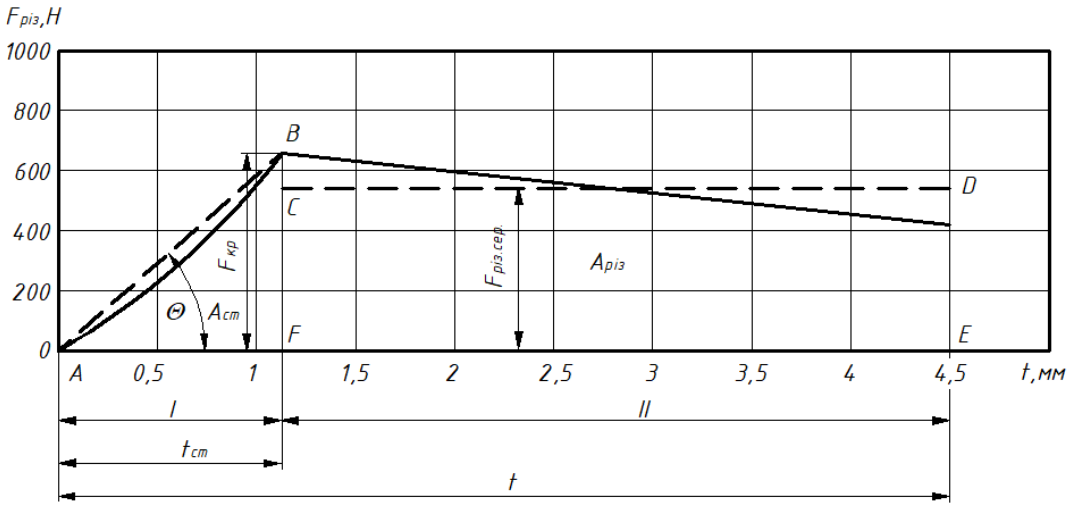


Рис. 7. Діаграма різання натуральної шкіри низу взуття в динамічному режимі

На основі отриманих експериментальних та розрахункових даних були побудовані графіки

залежності середнього зусилля різання $F_{різ.сер.}$, загальної роботи A, роботи різання $A_{різ}$, роботи стискання $A_{ст}$, коефіцієнту корисної роботи λ і величини стискання матеріалу $t_{ст}$ від швидкості різання $V_{різ}$ натуральної шкіри низу взуття (рис. 8).

На рис. 9 наведені відзняті кадри етапів занурення різака у матеріал в динамічному режимі.

Далі було проведено дослідження по знаходженню технологічних особливостей швидкісного різання зразків взуттєвих матеріалів, а саме чистоти торцевої поверхні зразка. Якість лінії різу визначається декількома показниками, а саме: надійністю розділення матеріалу, шириною лінії різу, виглядом зрізу і величиною зони деструкції [2]. Зразки поверхні деталі взуття з натуральної шкіри низу (чепрака) отриманні при різанні в статичному і динамічному режимах приведені на рис. 10. Як видно з них при швидкісному різанні різак прорізає матеріал на всю його товщину (рис 10, а). Торцева поверхня отримується рівною і гладкою. При різанні в статичному режимі (рис. 10, б) спостерігається випереджаючий розрив матеріалу перед різаком в результаті якого поверхня розриву отримується шорсткою.

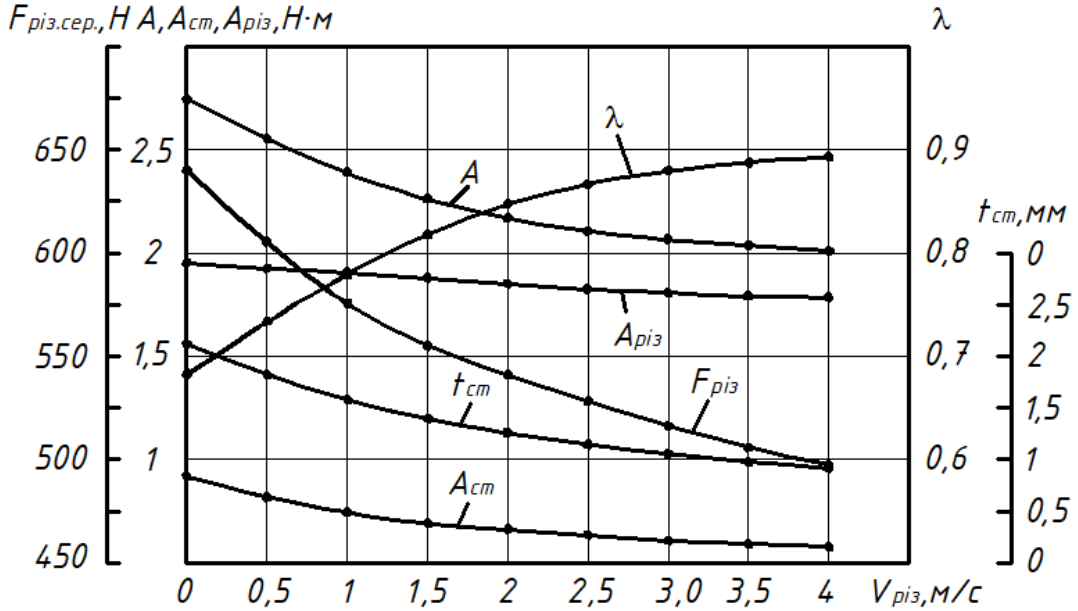
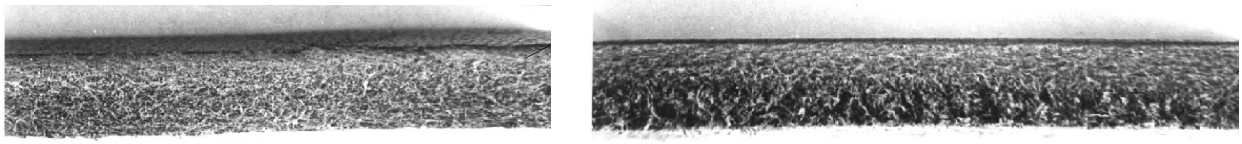


Рис. 8. Графіки залежності середнього зусилля різання $F_{різ.сер.}$, загальної роботи A, роботи різання $A_{різ}$, роботи стискання $A_{ст}$, коефіцієнту корисної роботи λ і величини стискання матеріалу $t_{ст}$ від швидкості різання $V_{різ}$ натуральної шкіри низу взуття

а б в

Рис. 9. Етапи занурення різака в натуральну шкіру низу взуття: а – стискання; б – різання; в – зона недеформованого матеріалу



а б

Рис. 10. Зразки поверхонь торців зразка з натуральної шкіри низу взуття при різанні: а – в статичному режимі; б – в динамічному режимі

Висновки

1. Експериментально було встановлено залежність загальної роботи A і попереднього стискання матеріалу $t_{ст}$ від швидкості різання $V_{різ}$ в діапазоні швидкостей 1–4 м/с. При динамічній дії леза на матеріал

різання настає раніше, зменшується величина роботи стискання $A_{ст}$, що і підтвердив експеримент.

Також результати експериментальних досліджень показали, що при різанні взуттєвого матеріалу має місце залежність $F_{різ}=f(V_{різ})$, тобто робота різання зі збільшенням швидкості різання зменшується. Це можна пояснити збільшенням коефіцієнту корисної роботи леза λ. При більшій величині λ різання стає більш вигідним з точки зору енерговитрат.

При різанні матеріалу на малих швидкостях енергія витрачається нераціонально, збільшується доля її витрат на попереднє стискання шару матеріалу, тобто на тертя та деформацію всередині нього.

Аналіз отриманих експериментальних даних показав, що питома робота різання $A_{пит}$ зі збільшенням швидкості зменшується. При динамічному різанні на зменшення питомої роботи $A_{пит}$ зі збільшенням швидкості також впливає робота $A_{ст}$, що витрачається на попереднє стискання шару матеріалу. Як показав експеримент, зі збільшенням швидкості робота на стикання матеріалу зменшується. Це можна пояснити тим, що при динамічній дії леза на шар матеріалу різання наступає раніше, ніж шар буде мати щільність, необхідну для статичного різання. Тому, коефіцієнт корисної роботи леза, як вже відмічалося, зі збільшенням швидкості різання зростає.

2. Динамічне різання порівняно зі статичним, можна охарактеризувати появою додаткових факторів: збільшення різниці між швидкістю прикладання навантаження зі сторони леза і швидкістю розподілення деформацій в матеріалі; зниження сили сухого тертя; збільшення «інерційного підпору» шарами матеріалу; значного зменшення кута різання тощо.

3. Експериментально встановлено зростання коефіцієнту корисної роботи леза різака λ і відповідно зменшення сили різання $F_{різ}$ і загальної роботи різання A зі збільшенням швидкості різання $V_{різ}$. Це можна пояснити зміною співвідношення швидкостей розповсюдження напружень і деформацій в матеріалі. Напруження, що виникають в місці контакту леза із шаром матеріалу, передаються з певною швидкістю в матеріал. Швидкість розповсюдження напружень відповідає і швидкості розповсюдження деформацій. Пружні напруження розповсюджуються в матеріалі зі швидкістю звуку, в той час як залишкові – доволі повільно. У в'язко-пружному матеріалі швидкість розповсюдження напружень незначна, тому удар леза передається в шар повільно і, відповідно, при більшій швидкості нанесення такого удару, напруження, що виникають від нього, будуть сконцентрованими (локалізованими) біля леза. Таким чином можна пояснити те, що місцеві руйнування матеріалу під лезом різака відбуваються з меншими витратами енергії.

4. Для локалізації впливу леза при значній швидкості його занурення у шар матеріалу, мають значення і прискорення, що виникають у прошарках шару матеріалу від прагнення леза вивести їх зі стану спокою та миттєво надати їм значну швидкість. Величина цих прискорень, не дивлячись на незначну масу прошарків, досягається за рахунок швидкості значних величин, що обумовлюють виникнення інерційних сил. Величина сил є достатньою для локалізації деформацій і створення «інерційного підпору».

Наявність такого явища підтверджується зменшенням величини попереднього стискання матеріалу $t_{ст}$ зі збільшенням швидкості різання $V_{різ}$. Особливо це було актуально для різання взуттєвих матеріалів з анізотропними властивостями. Як видно з діаграми різання натуральної шкіри низу взуття в статичному режимі (рис. 3) на етапі різання наявність рихлого стану в матеріалі приводить до зміни величини сили різання $F_{різ}$. Для рихлого шару в матеріалі «інерційний підпір» набуває великого значення. При динамічному різані даного матеріалу (рис. 7) виникнення «інерційного підпору» приводить до зменшення величини попереднього стискання $t_{ст}$ і відповідно зростання коефіцієнту корисної роботи леза.

Для певних матеріалів при деяких величинах швидкості різання «інерційний підпір» може набувати такого значення при якому попереднє стискання матеріалу може бути взагалі відсутнім, тобто $t_{ст}=0$. Тоді робота стискання $A_{ст}=0$, а загальна робота різання A стає рівною роботі $A_{різ}$. При цьому коефіцієнт корисної роботи відповідно до виразу (13) $\lambda=1$. Це означає, що вся робота леза буде витрачатися безпосередньо на різання і некорисна робота на попереднє стискання матеріалу лезом буде усунена завдяки вибору відповідного режиму різання.

5. Більшість взуттєвих і швейних волокнистих матеріалів є анізотропними матеріалами з неоднаковими механічними властивостями по різних напрямах. Одним із шляхів зниження анізотропних властивостей є ущільнення матеріалу під час виконання технологічної операції різання. Наприклад, штучне стискання матеріалу вакуумом при виконанні операції різання матеріалів на автоматизованих розкрійних комплексах, приводить до зменшення його анізотропності.

Отримані результати експериментальних досліджень підтвердили, що на зниження $F_{різ}$ і A зі збільшенням $V_{різ}$ суттєвий вплив буде мати ущільнення матеріалу. Чи більше ущільнений матеріал, тим меншою є робота попереднього стискання матеріалу $A_{ст}$ лезом, а відповідно і загальна робота різання A.

6. Для оцінювання процесу руйнування і, зокрема, різання в'язко-пружних матеріалів, особливо волокнистих, істотним показником є чистота зрізу. В ході проведення експериментальних досліджень встановлено взаємозв'язок між швидкістю різання і чистотою зрізу. Під останньою розуміється макрошорсткість поверхні зрізу, тобто поверхні, по якій матеріал під дією леза розділяється на частини. Зі збільшенням швидкості різання $V_{різ}$ чистота зрізу покращується. Враховуючи сумарну площу поверхні зрізу, можна констатувати, що ця площа поверхні при малих швидкостях більша, чим при великих за рахунок макровиступів і макровпадин, що виникають на поверхні зрізу.

Поліпшення чистоти зрізу при динамічному різанні матеріалу можна пояснити наступним. Передбачається, що в'язко-пружний матеріал внаслідок своєї анізотропності, і, як правило волокнистої

будови, на різній глибині шару має слабкі перерізи, що не співпадають із площиною розрізання. При незначних швидкостях різання руйнування матеріалу проходить саме по цих слабких перерізах, що не співпадають з площиною розрізання, і тому зріз отримується не чистий. Чим більша швидкість різання відносно швидкості розповсюдження деформації в матеріалі, тим повільніше хвиля напружень доходить до менш віддалених від розрізу слабких перетинів у шарі та їх руйнування відбувається ближче до перетину розрізу. Цим і пояснюється більш чистий зріз. При значних швидкостях різання, руйнування шару буде проходити тільки по поверхні розрізу на якій сконцентровано (локалізовано) напруження.

Чистота торцевої поверхні деталі найбільш актуальна для виконання операції перфорування деталей взуття.

7. Аналіз отриманих діаграм різання взуттєвих матеріалів в статичному та динамічному режимах різання показав наступне. При статичному режимі різання матеріалу проходить у три етапи: стискання матеріалу лезом робочого інструменту; різання матеріалу та розсовування нижнього шару. Наявність етапу розсовування негативно впливає на якість зрізу матеріалу. При динамічному різанні відсутній етап розсовування матеріалу після розриву. Натомість, з'являється в кінці виконання операції різання зона матеріалу, що практично не деформується. На утворення такої зони впливає більшість факторів, розглянутих вище. Наявність такої зони приводить до повного різання матеріалу різаком без утворення випереджаючої тріщини та підвищення якості зрізу матеріалу.

Література

1. Резник Н.Е. Теория резания лезвием и основы расчёта режущих аппаратов / Резник Н.Е. – М. : Машиностроение, 1975. – 311 с.

2. Базюк Г.П. Резание и режущий инструмент в швейном производстве / Базюк Г.П. – М. : Легкая индустрия, 1980. – 192 с.

References

1. Reznik N.E. Teorija rezanija lezviem i osnovy raschjota rezhushhih apparatov / Reznik N.E. – M. : Mashinostroenie, 1975. – 311 s.
2. Bazjuk G.P. Rezanie i rezhushhij instrument v shvejnom proizvodstve / Bazjuk G.P. – M. : Legkaja industrija, 1980. – 192 s.

Рецензія/Peer review : 12.11.2018 р. Надрукована/Printed :15.2.2019 р.
Рецензент: к.т.н., проф. Драпак Г.М.

DOI 10.31891/2307-5732-2019-269-1-27-30
UDC 687.053.632

O.P. MANOILENKO, V.A. GOROBETS, D.O. NENNO
Kyiv National University of Technologies and Design

DEVELOPMENT OF THE DOUBLE THREAD CHAIN STICH SEWING MACHINE WITH REVERSE MOVEMENT

In the work, we propose the algorithm of modernization of a specific chain stitch sewing machine, as a result of which significant expansion of technological possibilities of this machine is possible. In this work, the essence of the problem solved through the modernization, the composition and structure of devices, which need to be mounted in the machine, and their connection with the existing mechanisms of the machine, are developed. In addition, we provide the calculation of the main dimensional parameters of devices that provide reliable operation of the machine in both modes, as well as the trouble-free transition from one mode to another.

Keywords: sewing machine, fastening, chain stitch, reverse movement.

О.П. МАНОЙЛЕНКО, В.А. ГОРОБЕЦЬ, Д.О. НЕННО
Київський національний університет технологій та дизайну

РОЗРОБКА ШВЕЙНОЇ МАШИНИ ДВОНИТКОВОГО ЛАНЦЮГОВОГО СТІБКА З РЕВЕРСОМ

В роботі розглянутий алгоритм модернізації конкретної сточувальної швейної машини ланцюгового стібка, в результаті якої можливе суттєве розширення її технологічних можливостей. В роботі розкрита суть проблеми, яка вирішується при модернізації, розроблена структура та будова пристроїв, які необхідно вмонтувати в машину та показаний їх зв'язок з існуючими механізмами машини. Крім того в роботі виконаний розрахунок основних розмірних параметрів даних пристроїв, які забезпечують надійну роботу машини в обох режимах, а також безпроблемний перехід з одного режиму в інший.

Ключові слова: швейна машина, закріпка, ланцюговий стібок, реверсивний рух.

In case of the increase in the range of elastic materials, sewing machines of double thread chain stitch are widely used in relation to the known advantages of chain stitches. However, their propensity to break loose in the absence of the possibility of securing the ends of the rows by reversing the movement of cross-linked materials substantially hamper the further implementation of this type of equipment.

The main problem that arises in the reverse transportation of materials is the impossibility of providing the so-called "pierce" of the looper (L) loop with a needle (N) (fig. 1, a), or rather the needle's (N) hit in the "thread triangle" formed by the branches of the looper loop and the previous thread loop of the needle. There are several ways to solve this problem: the formation of a "thread triangle" with flow of air (F) (fig. 1, b) in the reverse, the use of additional tools — expanders (one or two) (fig. 1, c) [1, 2] or shutdown of the looper movement during the reverse (fig. 1, d) [3]. In practice, the last two methods have been used.

Therefore, in the work [4] they propose a double thread chain stich sewing machine with reverse movement of the material, where the stitch in the formation of fasteners is formed by disabling the longitudinal movement of the loop. However, the presence in the design of the mechanism of the lover of an elastic link, which constantly works at an angular speed of the main shaft of the machine 300-400 s^{-1}, can lead to a violation of the interaction of the loop with a needle, where the accuracy of the positioning is 0.1 mm. In addition, the need to design and embed a reversing device in machine, which the chain machines do not have in principle, significantly complicates and raises the machine. This can be seen on a similar machine developed by Juki (Japan) [5] several years ago. Due to the fact that it has additionally the mechanism of the diversion, besides of the mechanism of the looper also, as well as the already mentioned mechanism of reversal, the price of even the basic design is 3800 euros, and equipped with auxiliary devices — 5200 euros.

At the same time, the country has a sufficient number of fully working sewing machines of a constructive number 876 PMZ, whose prices in the secondary market is about 1000 UAH per unit.

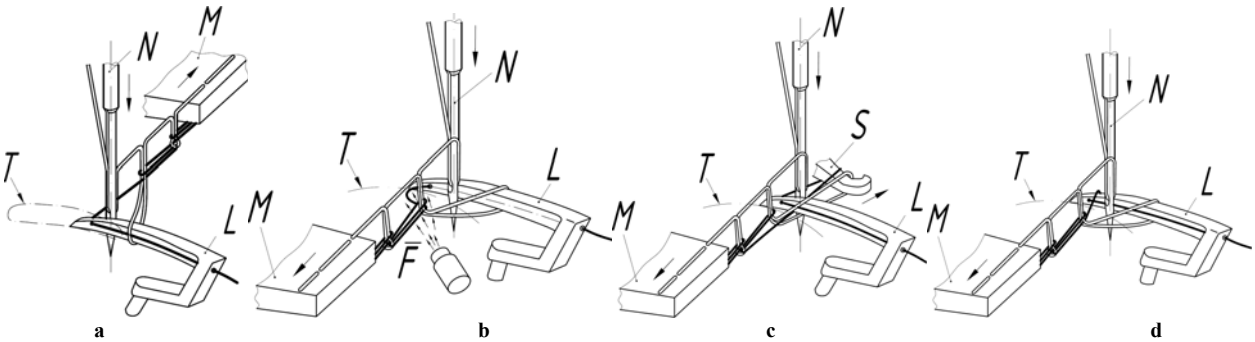


Fig. 1. The method of forming a "thread triangle": a - with direct movement of materials; b – by an air flow with reverse movement of materials; c – by extender in reverse movement of materials; d - by turning off the looper movement along the line

The authors, on the basis of those machines developed a sewing machine with a reverse, by reconstruction

of the looper mechanism (fig. 2, a, b) (options 1 and 2), in which the ellipsoid trajectory of the looper point (D) is obtained only by the kinematic chain of its transverse displacements and in which a switching device to turn off those movements of the looper is provided.

The reverse of material movement is done due to a change in the direction of rotation of the main shaft 1, for example, according to the classical circuitry of asynchronous motor reverse (fig. 3) when the lever 4 is pressed to turn off the looper movement (fig. 2) and pressing the S1 switch. The supply of the thread to the looper on the reverse is provided by an additional thread-giving cam 11, which is mirrored 10 and on which lower thread enters in the reverse by transferring it to the area of thread-giving cam 11 by a thread-fixing unit 9, which occupies a corresponding position using the levers 4 and 8, which are connected by thrust 7.

Thus, with the help of simple modernization, it is possible to obtain equipment with an important additional function, and which has a simpler design than the base machine.

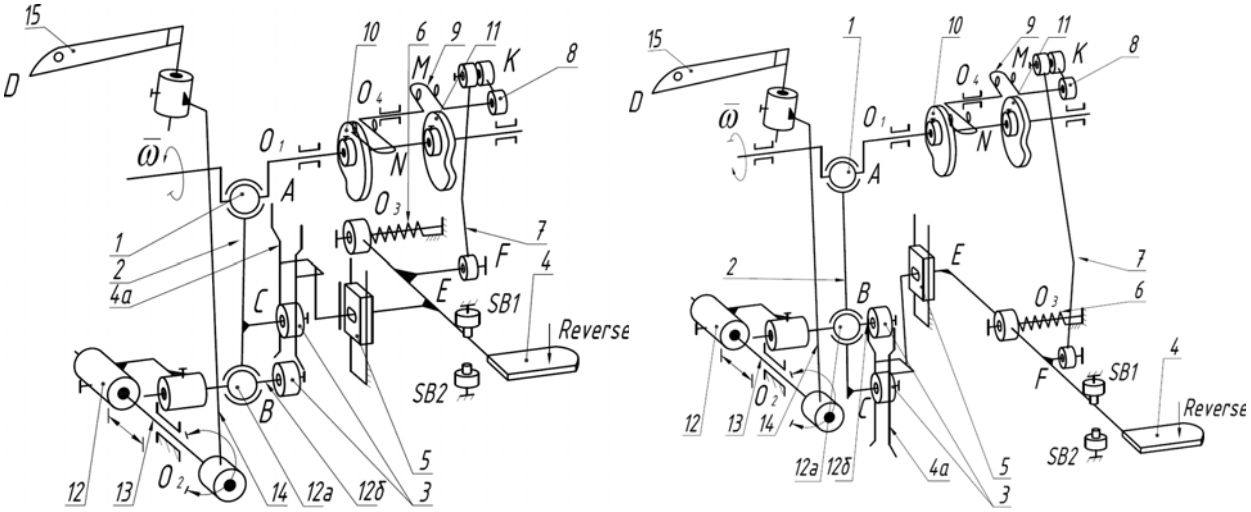


Fig. 2. Mechanisms of the looper and thread-giving unit: a - modification 1; b - modification 21 - the knee of the main shaft; 2 - connecting rod; 3 - roller; 4 - lever; 5 - a slider; 6 - a spring; 7 - thrust; 8 - lever; 9 - a block of thread-fixing units; 10 - giving cam (straight-movement); 11 - giving cam (reverse); 12 - rocker; 12a - spherical finger; 12b - spherical finger process; 13 – looper shaft; 14 - the holder of the looper; 15 – looper

The main task of the above proposed modernization is to determine the parameters of the mechanism, the hand lever device and the distance between the axis of the rocker arm and the connecting rod in the mechanism of the looper. The peculiarity of the work of the looper mechanism is that switching to another mode of operation must be performed at the extreme lower position of the needle, which requires the use of a sensor for monitoring the position of the main shaft (encoder).

In this case, if you exclude longitudinal movements of the looper along the line, it should be installed before the needles at a distance Z' (fig. 4) to ensure the capture of the loop when it interacts with the needles, which must be achieved when moving the lever 4 and the guide 4a. The values of movement of the looper across the line Lx (fig. 4) and along the line Zx are determined by the method [6]. Parameters of the loop mechanism links: the value of the radius of the crank *r* (OA) (fig. 5), the length of the rocker L_{O2B} and the coordinates of the racks O_1 and O_2 are determined in part from constructive considerations, proceeding from the implementation of the required value and the law of the looper movement across the line Lx.

Parameter l_{BC} (BC) defines the position of the connecting rod, which operates in a straight line with the necessary looper movement along the line Zx, but also the constructive parameters of the mechanism (the possibility of alternate interaction of rollers 3 with direction 4a). Therefore, the calculation is reduced to determining the length of the connecting rod l_{AB}. For the proposed variants 1, 2 of the looper, the parameter l_{BC} is determined by the expressions (fig. 5):

$$l_{BC_1} = \frac{Z_x \cdot l_{AB}}{2 \cdot r + Z_x}, \quad (1)$$

$$l_{BC2} = \frac{Z_x \cdot l_{AB}}{2 \cdot r}, \quad (2)$$

where l_{AB} – length of the connecting rod, mm;
r – radius of the knee of the main shaft, mm;
Z_X – the movement of the looper along the line, mm;
d – roller diameter (height of the slider), mm.

For both variants of the mechanism, the condition of connecting only one roller (slider) in the guides must also be performed:

$$l_{BC_{1,2}} \geq 2 \cdot r + d \ . \quad (3)$$

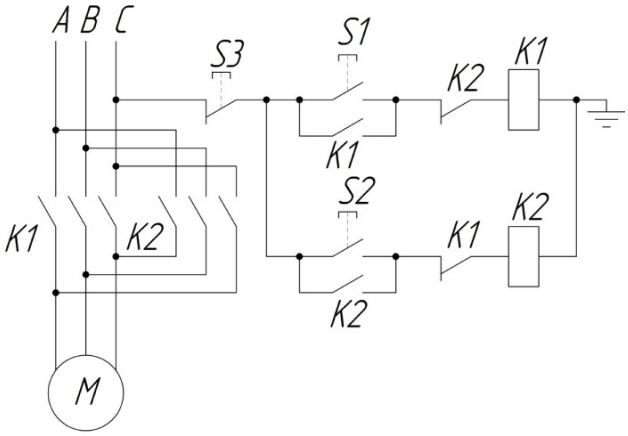


Fig. 3. Electrical control scheme of the electric motor reverse

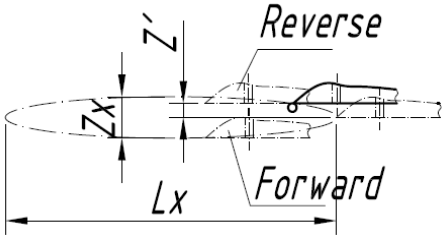
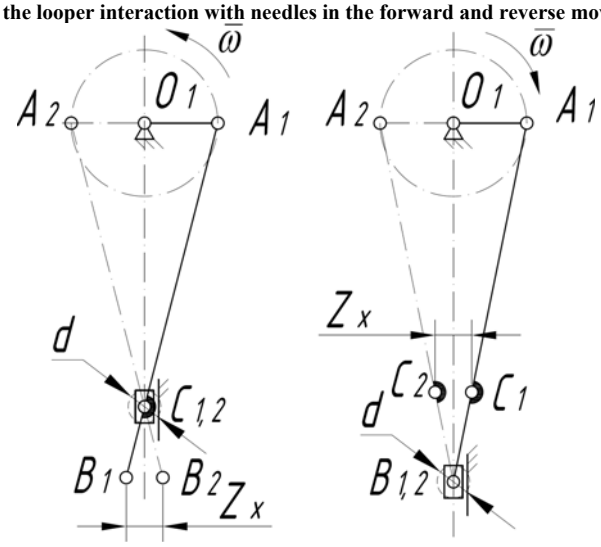


Fig. 4. Parameters of the looper interaction with needles in the forward and reverse movement of the material



a **b**

Fig. 5. Schemes of the parameter $h_{1,2}$ of the looper's mechanism:
a - modification 1; b - modification 2

Substituting (3) into (1) and (2) we obtain the minimum required length of the connecting rod for both variants.

$$l_{AB1} = \frac{(2 \cdot r + d)(2 \cdot r + Z_x)}{Z_x}, \quad (4)$$

$$l_{AB2} = \frac{(2 \cdot r + d)2 \cdot r}{Z_x}. \quad (5)$$

Let's perform a calculation of the length of the connecting rod l_{AB} for the machine 876 PMZ according to the following data: r = 6 mm, Zx = 4 mm, d = 6 mm.

$$l_{AB1} = 72 \text{ mm}, \; l_{AB2} = 54 \text{ mm}.$$

Thus, only the second option can be used in this machine.

Extension of the length of the connecting rod AB by 21 mm (l_{AB876}=33 mm) can be made, because under the bottom of the connecting rod there is a deep crankcase with lubrication liquid.

To provide the position of the looper point D (fig. 2) in the reverse movement of the material, it is possible to get its offset by the lever l_{O3E} (O_3E) (fig. 6) of the rocker, whose length is determined by the expression:

$$l_{O_3E} = \frac{Z'^2 + l_{BC_{1,2}}^2}{2 \cdot Z'},$$

where Z' – the value of looper movement along the line at the moment of snapping the loop, mm.

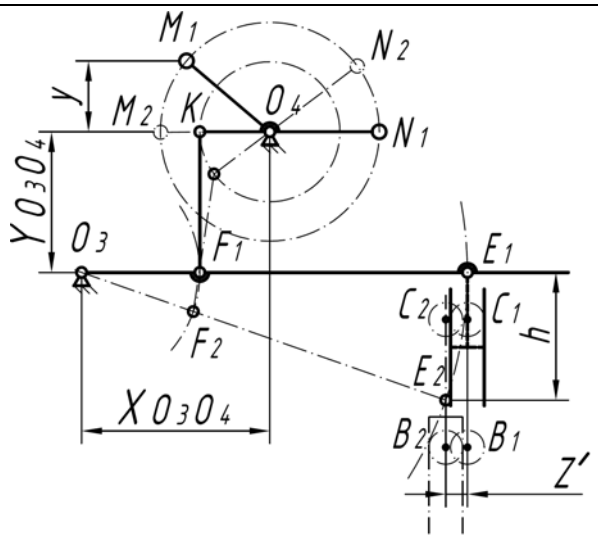


Fig. 6. Scheme of functional groups for turning off the looper movements across the line and switching the thread feed mechanisms

The minimum value of h (fig. 6) – the movement of the guide 4a to ensure interaction is determined by the expression:

$$h \geq 2 \cdot r + d$$

At the same time, the rocker should provide the switching of thread-fixers N and M (fig. 6) to the working position, which is achieved by the lengths of the shoulders l_{O4K} and l_{O3F}, and the minimum necessary amount of movement of the thread-fixing units, which eliminates the contact of the thread with the profile of the thread-giving cam.

The size of the shoulders l_{O3F}, l_{O4K} and connecting rod l_{FK} can be proposed constructively.

$$l_{O_4K} = \frac{l_{O_3F} \cdot h}{l_{O_3E} \cdot y} \cdot l_{O_4M},$$

where y – position of the thread-fixing unit relative to the surface of the thread-giving cam in the off condition (y = 10 mm for a constructive row of sewing machines 876).

The coordinates of the rack O4 are determined by the expressions:

$$X_{O_3O_4} = l_{O_3F} + l_{O_4K}, \quad Y_{O_3O_4} = l_{FK}.$$

Conclusions. The proposed algorithm for upgrading the flat chain stitch sewing machine allows to significantly expand the range of technological operations that it can perform at a minimal cost.

References

1. JUKI : catalog. – M. : Ynlegmash, 1982.
2. Polukhin V.P. Shveynyye mashiny tsepnogo stezhka zarubezhnykh firm / Polukhin V.P., Reybarkh L.B. – M. : Legkaya industriya, 1979. – 344 p.
3. A.s. № 617499 SSSR MPK D05V 1/10. Sposob polucheniya dvunitochnoy tsepnoy strochki pri pryamom i obratnom eye peremeshchenii / V.A. Pishchikov. V.V. Egorov. – Opubl. 30.07.78. Byul. № 28. – 26 p.
4. A.s. № 825728 SSSR. MPK D05B 1/10. Shveynaya mashina dvokhnitochnogo tsepnogo sterzhka / V.A. Pishchikov. V.V. Egorov. – Opubl. 30.04.81. Byul. № 16. – 21 p.
5. JUKI Main&Technology // Juki Corporation. URL: http/www.juki co. jp.
6. Pischikov V. A. Opredelenie hodov petlitelya mashin dvuhnitochnogo tsepnogo stezhka / V. A. Pischikov, N. N. Saraev, A. I. Trachun // Izvestiya vuzov. Tehnologiya legkoy promyishlennosti. – 1974. – № 3, № 4.

Рецензія/Peer review : 26.11.2018 р. Надрукована/Printed :15.2.2019 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Орловський Б.В.

DOI 10.31891/2307-5732-2019-269-1-31-36
УДК 539.3

А.О. СЯСЬКИЙ, Н.В. ШЕВЦОВА
Рівненський державний гуманітарний університет
О.Ю. ДЕЙНЕКА
Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне

МІЖФАЗНИЙ РОЗРІЗ В ОРТОТРОПНІЙ ПЛАСТИНЦІ З ЕЛІПТИЧНИМ КОНТУРОМ, ПІДСИЛЕНИМ ЗАМКНЕНИМ ПРУЖНИМ РЕБРОМ

В умовах узагальненого плоского напруженого стану розглянуто мішану контактну задачу для нескінченної ортотропної пластинки з еліптичним отвором, контур якого підсилений замкненим пружним ребром, за наявності на межі поділу матеріалів пластинки і ребра симетричного міжфазного розрізу нульової ширини. Моделюючи підсилювальне ребро криволінійним стрижнем сталого прямокутного поперечного перерізу, серединна поверхня якого не співпадає з поверхнею отвору, побудовано систему сингулярних інтегрально-диференціальних рівнянь для визначення контактних зусиль між пластинкою і ребром, а також внутрішніх сил і моментів у ребрі. Розрахунок початкових параметрів у статично невизначеному підсилювальному ребрі здійснено методом сил. Встановлено структуру шуканих функцій на кінцях ділянки сполучення пластинки і ребра. Наближений розв'язок задачі побудовано методом механічних квадратур і колокації , яким досліджено вплив ортотропії матеріалу пластинки і форми отвору на розподіл напружень в пластинці та підсилювальному ребрі.

Ключові слова: міжфазний розріз, ортотропна пластинка, пружне ребро, поперечна і поздовжня сили, згинальний момент, сингулярні інтегральні рівняння, контактні зусилля.

A.O. SIASKYI, N.V. SHEVTSOVA
Rivne State University of Humanities
O.Y. DEJNEKA
National University of Water Management and Natural Resources, Rivne

INTERFACIAL INCISION IN ORTHOTROPIC PLATE WITH AN ELLIPTICAL CONTOUR, REINFORCED BY A CLOSED RESILIENT RIB

In the conditions of generalized plane stressed state, a mixed contact problem for an infinite orthotropic plate with an elliptical opening whose contour is reinforced by a closed resilient rib is considered in the presence on the boundary of the separation of a plate and rib the symmetric interfacial incision of the zero width. By modelling the reinforcing rib a curved rod of a constant rectangular cross-section, the middle surface of which does not coincide with the surface of the opening, the basic equations of one-dimensional theory are written, which, taking into account the hypothesis of plane cross sections and deformations of the transverse displacement, determine the stress-strain state of the rib. The boundary conditions of the problem are formulated in the form of conditions for the joint deformation of the plate and the rib. Together with the differential equations of strengthening and the canonical equations of the method of forces, they determine the system of singular integral-differential equations for determining the contact efforts between the plate and the rib, as well as the internal forces and moments in the rib. The structure of the searched functions at the ends of the connection area of the plate and the rib are established. The approximate solution of the problem is constructed by the method of mechanical quadratures and collocation, with which it investigated the influence of the orthotropy of the plate material and the shape of the opening on the distribution of stresses in the plate and the reinforcing rib. The essential dependence of the components of the stressed state in the plate and the rib on the shape of the opening and the physical parameters of the plate material are established.

Keywords: interfacial incision, orthotropic plate, resilient rib, transverse and longitudinal forces, bending moment, singular integral equations, contact efforts.

Вступ

У сучасних конструкціях, машинах і спорудах широко використовуються композитні матеріали та кусково-однорідні структури, зокрема анізотропні пластинки з отворами. Для зменшення високої концентрації напружень біля отворів їх контури підсилюють пружними ребрами Будучи розсіювачами концентрації напружень ці ребра суттєво збільшують жорсткість і стійкість пластинки.

Розв'язок задачі визначення напружено-деформованого стану пластинки з отвором, контур якого підсилено пружним ребром , суттєво залежить від вибору математичної моделі, яка описує деформацію ребра. На даний час найбільш поширеною є модель криволінійного стрижня сталого поперечного перерізу, серединна поверхня якого не співпадає з нульовою поверхнею для чистого згину і поверхнею отвору в пластинці [1–4].

Використовуючи цю модель в роботах [1, 3, 5] розглянуто низку задач про контактну взаємодію ортотропної пластинки з криволінійним отвором і замкненого пружного ребра при їх сполученні з гарантованим натягом або методом зварювання.

В процесі виготовлення або експлуатації пластинок із замкненими ребрами жорсткості на межі з'єднання різнорідних матеріалів виникають дефекти, зокрема, тріщини або розрізи нульової ширини, які можуть зумовити високу концентрацію напружень і подальше міжфазне руйнування за дії силового навантаження.

Задачі розрахунку напруженого стану пластинки з підкріпленим криволінійним отвором за наявності міжфазного розрізу між пластинкою і ребром в умовах узагальненого плоского напруженого стану досліджені недостатньо. Так в роботах [6, 7] побудовано наближені розв'язки задач для нескінченної ізотропної і ортотропної пластинок з круговим отвором. Для отворів, відмінних від кругового, такі задачі не

розглядалися.

Пропонується числово-аналітичний розв'язок задачі про підсилення контуру еліптичного отвору в нескінченній ортотропній пластинці, яка перебуває в умовах узагальненого плоского напруженого стану, замкненим пружним ребром за наявності симетричного міжфазного розрізу, береги якого в процесі деформації не контактують.

Постановка задачі

Розглянемо нескінченну ортотропну пластинку товщиною $2h$ з еліптичним отвором, контур якого підсилений ізотропним пружним ребром сталого прямокутного поперечного перерізу шириною 2η і товщиною $2h_0$. Розглянута конструкція перебуває в умовах узагальненого плоского напруженого стану, створеного рівномірно розподіленими зусиллями p і q, що діють на нескінченності в напрямках осей еліпса. Це означає, що всі компоненти напруженого стану пластинки і ребра діють в їх спільній серединній площині, яка віднесена до системи декартових (x, y) і полярних (r, δ) координат з полюсом в центрі отвору. Системи відліку обираємо так, щоб вісь Ox співпадала з полярною віссю, віссю симетрії еліпса і визначала один із головних напрямків ортотропії матеріалу пластинки (рис. 1).

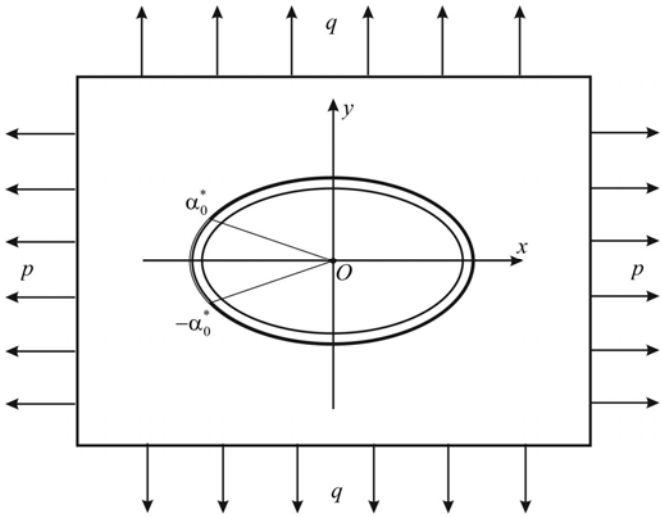


Рис. 1. Розрахункова схема пластинки з підкріпленим отвором

Припустимо, що в результаті виготовлення пластинчастої конструкції чи її експлуатації зовні симетричної ділянки $\left[-\alpha_0^*, \alpha_0^*\right]$ (α_0^* – полярний кут) на лінії Γ сполучення пластинки і ребра виник міжфазний розріз нульової ширини, береги якого в процесі деформації не контактують.

Мета роботи – визначення компонент напруженого стану на контурі Γ в пластинці і підсилювальному ребрі та дослідженні впливу на ці величини міжфазного розрізу.

Основні рівняння задачі

Умовно розділимо двокомпонентну конструкцію на окремі елементи (нескінченна пластинка з еліптичним отвором і пружне підсилювальне ребро), замінюючи дію одного тіла на інше невідомими контактними зусиллями.

Нескінченна ортотропна пластинка перебуває у рівновазі під дією навантаження на нескінченності і нормальних T_ρ та дотичних $S_{\rho\lambda}$ контактних зусиль, що передаються до контуру Γ від підсилювального ребра.

Нехай форма еліптичного отвору в пластинці визначається функцією [8]

$$z = x + iy = \omega(\zeta) = R_0\left(\zeta + \frac{\varepsilon}{\zeta}\right), \tag{1}$$

яка реалізує конформне відображення зовнішності S^- одиничного кола γ в площині $\zeta = \tilde{\rho}e^{i\lambda}$ на область, яку займає серединна площина пластинки. Тут $R_0 = (a+b)/2 = 1$ – характерний розмір отвору; ε – ексцентриситет еліпса; $a = 1+\varepsilon$, $b = 1-\varepsilon$ – півосі еліпса; $(\tilde{\rho}, \lambda)$ – полярні координати точок в площині ζ; $i = \sqrt{-1}$.

Параметри деформації контуру Γ (відносне видовження та кут повороту нормалі) в пластинці при заданому її навантаженні визначаються за формулами [9]

$$\varepsilon_\lambda = \frac{1}{2E_x h(\alpha^2+\beta^2)}\left\{C(\lambda)T_\rho(\lambda) - \frac{1}{\pi}\int_{-\alpha_0}^{\alpha_0}\left[\Phi_1(\lambda, t)T_\rho(t) + \Phi_2(\lambda, t)S_{\rho\lambda}(t)\right]dt + \alpha\tilde{\varepsilon}_\lambda^0 + \beta\tilde{V}^0\right\};$$

$$V=\frac{1}{2E_x h(\alpha^2+\beta^2)}\left\{C(\lambda)S_{\rho\lambda}(\lambda)+\frac{1}{\pi}\int_{-\alpha_0}^{\alpha_0}\left[\Phi_3(\lambda,t)S_{\rho\lambda}(t)+\Phi_4(\lambda,t)T_\rho(t)\right]dt+\alpha\tilde{V}^0-\beta\tilde{\varepsilon}_\lambda^0\right\}, \quad (2)$$

в яких введено позначення

$$\Phi_1(\lambda,t)=H_1(\lambda,t)-G_1(\lambda,t)\operatorname{ctg}\frac{\lambda-t}{2};\ \Phi_3(\lambda,t)=H_2(\lambda,t)-G_2(\lambda,t)\operatorname{ctg}\frac{\lambda-t}{2};\ C(\lambda)=(\beta_1\beta_2-\nu_1)(\alpha^2+\beta^2);$$

$$\Phi_2(\lambda,t)=-G_1(\lambda,t)-H_1(\lambda,t)\operatorname{ctg}\frac{\lambda-t}{2};\ \Phi_4(\lambda,t)=G_2(\lambda,t)+H_2(\lambda,t)\operatorname{ctg}\frac{\lambda-t}{2};\ \alpha+i\beta=\omega'(\sigma);\ \sigma=e^{i\lambda};$$

$$H_1(\lambda,t)=-c_2\alpha(\lambda)\alpha(t)-c_4\beta(\lambda)\beta(t)+c_3\left[\alpha(\lambda)\beta(t)+\beta(\lambda)\alpha(t)\right];\ c_2=\frac{\beta_1+\beta_2}{2}\left[(1-\beta_1\beta_2)\cos^2\lambda-1\right];$$

$$H_2(\lambda,t)=c_4\beta(\lambda)\alpha(t)-c_2\alpha(\lambda)\beta(t)-c_3\left[\alpha(\lambda)\alpha(t)-\beta(\lambda)\beta(t)\right];\ c_3=\frac{\beta_1+\beta_2}{2}(1-\beta_1\beta_2)\cos\lambda\sin\lambda;$$

$$G_1(\lambda,t)=c_2\beta(\lambda)\beta(t)+c_4\alpha(\lambda)\alpha(t)+c_3\left[\alpha(\lambda)\beta(t)+\beta(\lambda)\alpha(t)\right];\ c_4=\frac{\beta_1+\beta_2}{2}\left[(1-\beta_1\beta_2)\sin^2\lambda-1\right];$$

$$G_2(\lambda,t)=c_4\alpha(\lambda)\beta(t)-c_2\beta(\lambda)\alpha(t)+c_3\left[\beta(\lambda)\beta(t)-\alpha(\lambda)\alpha(t)\right];\ \tilde{\varepsilon}_\lambda^0+i\tilde{V}^0=\frac{p}{2}\left[a+b(\beta_1+\beta_2-\beta_1\beta_2)-\right.$$

$$\left.-\left(a+b(\beta_1+\beta_2+\beta_1\beta_2)\right)e^{-2i\lambda}\right]++\frac{q}{2}\left[a(-1+\beta_1+\beta_2)\beta_1\beta_2+b\beta_1^2\beta_2^2+\beta_1\beta_2\left(a(1+\beta_1+\beta_2)+b\beta_1\beta_2\right)e^{-2i\lambda}\right]; \quad (3)$$

E_x, ν_x – модуль Юнга і коефіцієнт Пуассона матеріалу пластинки в напрямку осі Ox; β_1, β_2 – корені характеристичного рівняння [8]; $[-\alpha_0,\alpha_0]$ – образ ділянки $\left[-\alpha_0^*,\alpha_0^*\right]$ при відображенні (1).

Якщо контактні зусилля стануть відомі, то кільцеві зусилля на Γ визначаються за формулою [9]

$$T_\lambda=-\frac{(1+\beta_1)(1+\beta_2)}{4\Delta_1\Delta_2}\left[\left(l_1l_2+(a+b)l_4\sin^2\lambda\cos^2\lambda\right)R_1+\left((a+b)l_1-l_2l_4\right)R_2\sin\lambda\cos\lambda\right]-$$

$$-\frac{(1-\beta_1)(1-\beta_2)}{4\Delta_1\Delta_2}\left[\left(l_4(b-a)\sin^2\lambda\cos^2\lambda-l_1l_3\right)\tilde{R}_3+\left(l_4l_3+(b-a)l_1\right)\tilde{R}_4\sin\lambda\cos\lambda\right]+T_\lambda^0. \quad (4)$$

Тут

$$R_1=-2T_\rho^*+\frac{1}{\pi}\int_{-\alpha_0}^{\alpha_0}\left[T_\rho^*(t)-S_{\rho\lambda}^*(t)\operatorname{ctg}\frac{\lambda-t}{2}\right]dt;\ R_2=-2S_{\rho\lambda}^*+\frac{1}{\pi}\int_{-\alpha_0}^{\alpha_0}\left[S_{\rho\lambda}^*(t)+T_\rho^*(t)\operatorname{ctg}\frac{\lambda-t}{2}\right]dt;$$

$$R_3=4T_\rho^*-R_1;\quad R_4=4S_{\rho\lambda}^*+R_2;\quad T_\lambda^0=\frac{l_5}{\Delta_1\Delta_2}\left[p(l_1+l_4\sin^2\lambda)+q\beta_1\beta_2(l_4\cos^2\lambda-l_1)\right];$$

$$\tilde{R}_3=R_3\cos2\lambda+R_4\sin2\lambda;\quad \tilde{R}_4=R_4\cos2\lambda-R_3\sin2\lambda;\quad T_\rho^*+iS_{\rho\lambda}^*=\left(T_\rho+iS_{\rho\lambda}\right)\omega'(\sigma);$$

$$l_1=a^2\sin^2\lambda-b^2\beta_1\beta_2\cos^2\lambda;\quad l_2=a\sin^2\lambda-b\cos^2\lambda;\quad l_3=a\sin^2\lambda+b\cos^2\lambda;$$

$$l_4=ab(\beta_1+\beta_2);\ l_5=a^2\sin^2\lambda+b^2\cos^2\lambda;\ \Delta_j=a^2\sin^2\lambda+b^2\beta_j^2\cos^2\lambda;\ (j=1,2). \quad (5)$$

Підсилювальне ребро моделюємо замкненим криволінійним стрижнем (кільцем) сталого прямокутного поперечного перерізу, який перебуває у рівновазі під дією контактних зусиль, що передаються до його зовнішньої поверхні від пластинки. Задача розрахунку напруженого стану такого стрижня статично невизначена.

Використовуючи ідею методу сил розрахунку статично невизначеної стрижневої системи, умовно переріжемо стрижень площиною $\lambda=-\pi$ і до торців перерізу прикладемо статично зрівноважені поздовжні сили N_0 і згинальні моменти L_b^0. Оскільки задача симетрична відносно осі Ox, то поперечні сили відсутні ($Q_0=0$). У результаті цього одержимо еквівалентний статично визначений розімкнений стрижень, який перебуває у рівновазі під дією навантаження на його торцях і контактних зусиль (рис. 2).

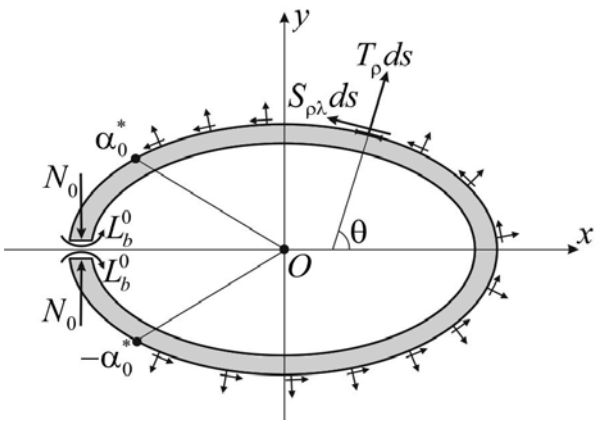


Рис. 2. Розрахункова схема підсилювального ребра

Компоненти його напруженого стану подамо у вигляді

$$N=-N_0\cos\theta+\tilde{N};\quad Q=-N_0\sin\theta+\tilde{Q};$$

$$L_b=L_b^0+\left[x-x_0-\eta(1+\cos\theta)\right]N_0+\tilde{L}_b, \quad (6)$$

де N, Q, L_b – поздовжня і поперечна сили та згинальний момент, що виникають у поперечних

перерізах і віднесені до його осі; $\tilde{N}$, $\tilde{Q}$, $\tilde{L}_b$ – відповідні складові компонент, що викликані контактними зусиллями, причому $\tilde{N}(-\alpha_0)=\tilde{Q}(-\alpha_0)=\tilde{L}_b(-\alpha_0)=0$; θ – кут нахилу нормалі в точці $(x,\ y)$ контуру Γ до осі Ox; $e^{i\theta}=e^{i\lambda}\omega'(\sigma)/|\omega'(\sigma)|$; $x_0=x(-\pi)$.

Напружено-деформований стан розімкненого ребра опишемо основними рівняннями одновимірної теорії криволінійних стрижнів, побудованими з урахуванням гіпотези плоских перерізів і деформацій поперечного зсуву [4, 10]:

- диференціальні рівняння рівноваги елемента стрижня при $\lambda\in[-\alpha_0;\ \alpha_0]$

$$T_\rho=\frac{\tilde{N}(\lambda)}{\rho}-\frac{1}{|\omega'(\sigma)|}\frac{d\tilde{Q}(\lambda)}{d\lambda};\quad S_{\rho\lambda}=-\frac{\tilde{Q}(\lambda)}{\rho}-\frac{1}{|\omega'(\sigma)|}\frac{d\tilde{N}(\lambda)}{d\lambda};\quad \frac{d\tilde{L}_b(\lambda)}{d\lambda}-\eta\frac{d\tilde{N}(\lambda)}{d\lambda}-|\omega'(\sigma)|\tilde{Q}(\lambda)=0, \tag{7}$$

в яких ρ – радіус кривини контуру Γ;

- фізичні залежності для зовнішнього поздовжнього волокна стрижня, яке контактує з пластинкою

$$\varepsilon_\lambda^{(c)}=\frac{1}{E_0F_0}\left[\tilde{N}(\lambda)+\frac{\eta+\eta_c}{\omega_0}\left(1-\frac{\eta}{\rho}\right)\left(\tilde{L}_b(\lambda)+L_b^0\right)+\frac{\eta+\eta_c}{\omega_0}\left(1-\frac{\eta}{\rho}\right)\left(x-\eta\cos\theta-(x_0+\eta)\right)N_0-N_0\cos\theta\right];$$

$$\frac{d\theta_b}{d\theta}=\frac{1}{E_0F_0}\left[\tilde{N}(\lambda)+\frac{\rho-\eta}{\omega_0}\tilde{L}_b(\lambda)-2\left(1+\nu_0\right)\mu\frac{d\tilde{Q}(\lambda)}{d\theta}+\frac{\rho-\eta}{\omega_0}L_b^0+\right.$$

$$\left.+\frac{\rho-\eta}{\omega_0}\left(x-(\eta+\eta_c)\cos\theta-(x_0+\eta)+2(1+\nu_0)\mu\eta_c\cos\theta\right)N_0\right];\quad \lambda\in[-\pi;\ \pi], \tag{8}$$

де введено позначення: $\varepsilon_\lambda^{(c)}$, θ_b – відносне видовження волокна і кут повороту нормалі до нього; E_0F_0 – жорсткість стрижня на розтяг (стиск); $F_0=2h_0\cdot 2\eta$ – площа його поперечного перерізу; E_0, ν_0 – модуль Юнга и коефіцієнт Пуассона матеріалу стрижня; η_c – відстань від осі стрижня до нейтрального для чистого згину поздовжнього волокна; $\omega_0=(\rho-\eta)\eta_c$; μ – стала (для прямокутного перерізу $\mu=1.2$);

- умови рівноваги підсилювального ребра як жорсткого цілого

$$\int_{-\alpha_0}^{\alpha_0}\left(T_\rho(\lambda)+iS_{\rho\lambda}(\lambda)\right)e^{i\lambda}\omega'(\sigma)\,d\lambda=0;\quad \tilde{L}_b(\alpha_0)-\eta\tilde{N}(\alpha_0)-\int_{-\alpha_0}^{\alpha_0}\tilde{Q}(\lambda)|\omega'(\sigma)|\,d\lambda=0, \tag{9}$$

які з урахуванням симетрії задачі відносно осі Ox і формул (6) можна перетворити до вигляду

$$\tilde{N}(\pm\alpha_0)=\tilde{Q}(\pm\alpha_0)=\tilde{L}_b(\pm\alpha_0)=0. \tag{10}$$

Останні співвідношення визначають структуру функцій $\tilde{N}$, $\tilde{Q}$, $\tilde{L}_b$ в околі кінців ділянки сполучення пластинки і підсилювального ребра.

Початкові параметри N_0, L_b^0 визначаються із канонічних рівнянь методу сил [2, 10]

$$\int_{-\alpha_0}^{\alpha_0}\left[\frac{\tilde{N}(\lambda)}{\rho}+\left(1-\frac{\eta}{\rho}\right)\frac{\tilde{L}_b(\lambda)}{\omega_0}\right]|\omega'(\sigma)|\,d\lambda+\int_{-\pi}^{\pi}\left[\frac{L_b^0}{\omega_0}+\frac{N_0}{\omega_0}\left(x-(\eta+\eta_c)\cos\theta-(x_0+\eta)\right)\right]\left(1-\frac{\eta}{\rho}\right)|\omega'(\sigma)|\,d\lambda=0;$$

$$\int_{-\alpha_0}^{\alpha_0}\left[(\rho\cos\theta-x)\frac{\tilde{N}(\lambda)}{\rho}+\left(1-\frac{\eta}{\rho}\right)\left(\left((\eta+\eta_c)\cos\theta-x\right)\frac{\tilde{L}_b(\lambda)}{\omega_0}-2\left(1+\nu_0\right)\mu\sin\theta\tilde{Q}(\lambda)\right)\right]|\omega'(\sigma)|\,d\lambda+$$

$$+N_0\int_{-\pi}^{\pi}\left[(x-\rho\cos\theta)\frac{\cos\theta}{\rho}+\left(1-\frac{\eta}{\rho}\right)\frac{\left((\eta+\eta_c)\cos\theta-x\right)\left(x-x_0-\eta(\cos\theta+1)\right)}{\omega_0}+\right.$$

$$\left.+\left(1-\frac{\eta}{\rho}\right)2\left(1+\nu_0\right)\mu\sin^2\theta\right]|\omega'(\sigma)|\,d\lambda+\frac{L_b^0}{\omega_0}\int_{-\pi}^{\pi}\left(1-\frac{\eta}{\rho}\right)\left[(\eta+\eta_c)\cos\theta-x\right]|\omega'(\sigma)|\,d\lambda=0, \tag{11}$$

які еквівалентні умовам однозначності зміщень точок осі стрижня і кутів повороту його поперечних перерізів.

Співвідношення (7), (8), (10), (11) визначають повну систему рівнянь для розрахунку напружено-деформованого стану замкненого підсилювального ребра.

Математична модель задачі

Крайові умови сполучення пластинки і підсилювального ребра формулюємо у вигляді умов їх сумісного деформування на ділянці сполучення

$$\varepsilon_\lambda=\varepsilon_\lambda^{(c)};\quad V=\theta_b;\quad \lambda\in[-\alpha_0;\ \alpha_0]. \tag{12}$$

Підставляючи (2), (8) в крайові умови (12), одержимо після певних перетворень систему сингулярних інтегральних рівнянь з ядрами Гільберта для визначення функцій T_ρ, $S_{\rho\lambda}$, $\tilde{N}$, $\tilde{Q}$, $\tilde{L}_b$ і сталих N_0, L_b^0.

$$\frac{E_0F_0}{2E_xh(\alpha^2+\beta^2)}\left\{C(\lambda)T_\rho(\lambda)-\frac{1}{\pi}\int_{-\alpha_0}^{\alpha_0}\left[\Phi_1(\lambda,t)T_\rho(t)+\Phi_2(\lambda,t)S_{\rho\lambda}(t)\right]dt+\alpha\tilde{\varepsilon}_\lambda^0+\beta\tilde{V}^0\right\}=$$

$$=\tilde{N}(\lambda)+\frac{\eta+\eta_c}{\omega_0}\left(1-\frac{\eta}{\rho}\right)\left(\tilde{L}_b(\lambda)+L_b^0\right)+\frac{\eta+\eta_c}{\omega_0}\left(1-\frac{\eta}{\rho}\right)\left(x-\eta\cos\theta-(x_0+\eta)\right)N_0-N_0\cos\theta; \quad (13)$$

$$\frac{E_0F_0}{2E_xh(\alpha^2+\beta^2)}\left\{C(\lambda)S_{\rho\lambda}(\lambda)+\frac{1}{\pi}\int_{-\alpha_0}^{\alpha_0}\left[\Phi_3(\lambda,t)S_{\rho\lambda}(t)+\Phi_4(\lambda,t)T_\rho(t)\right]dt+\alpha\tilde{V}^0-\beta\tilde{\varepsilon}_\lambda^0\right\}=$$

$$=\int_0^\lambda\left[\frac{\tilde{N}(\lambda)}{\rho}+\left(1-\frac{\eta}{\rho}\right)\left(\frac{\tilde{L}_b(\lambda)}{\omega_0}+\frac{L_b^0}{\omega_0}+\left(x-(\eta+\eta_c)\cos\theta-(x_0+\eta)\right)\frac{N_0}{\omega_0}\right)\right]\left|\omega'(\sigma)\right|d\lambda-2(1+\nu_0)\mu\left(\tilde{Q}(\lambda)-N_0\sin\theta\right);$$

Цю систему доповнюємо умовами зв'язку між функціями T_ρ, $S_{\rho\lambda}$ і $\tilde{N}$, $\tilde{Q}$, $\tilde{L}_b$ (7) та співвідношеннями (11) для визначення сталих N_0 і L_b^0.

Рівняння (7), (11), (13) визначають математичну модель сформульованої задачі і слугують для визначення контактних зусиль між пластинкою і підсилювальним ребром та внутрішніх силових факторів у ребрі. Покладаючи в них $\beta_1=\beta_2=1$, одержимо математичну модель задачі для ізотропної пластинки з еліптичним отвором. При $\varepsilon=0$ система (7), (11), (13) визначає розв'язок задачі для ортотропної пластинки з круговим отвором [7].

Наближений розв'язок задачі

Точний розв'язок системи (7), (11), (13) знайти не вдається. Для її наближеного розв'язання необхідно встановити структуру шуканих функцій на кінцях ділянки сполучення пластинки і ребра.

На підставі умов (10) можна зробити висновок, що функції $\tilde{N}$, $\tilde{Q}$ і $\tilde{L}_b$ обмежені та неперервні на проміжку $[-\alpha_0;\,\alpha_0]$, а на його кінцях дорівнюють нулю.

Оскільки розглядувана задача відноситься до мішаних контактних задач теорії пружності, то відповідно до [11], контактні зусилля T_ρ, $S_{\rho\lambda}$ на кінцях $\lambda=\pm\alpha_0$ мають кореневу особливість з локальною осциляцією. Нехтуючи її впливом, наближений розв'язок задачі побудуємо комбінованим методом механічних квадратур і колокації [9, 12, 13].

З цією метою перейдемо в системі (7), (11), (13) до проміжку інтегрування $[-1;\,1]$. Це можна зробити заміною змінних

$$\operatorname{tg}\frac{\lambda}{2}=a_0\xi;\quad \operatorname{tg}\frac{t}{2}=a_0s, \quad (14)$$

де

$$a_0=\operatorname{tg}\frac{\alpha_0}{2};\quad d\lambda=\frac{2a_0d\xi}{1+a_0^2\xi^2};\quad dt=\frac{2a_0ds}{1+a_0^2s^2};\quad \operatorname{ctg}\frac{\lambda-t}{2}dt=\frac{2ds}{\xi-s}+\frac{2a_0sds}{1+a_0^2s^2}.$$

Враховуючи структуру шуканих функцій на кінцях проміжку інтегрування $[-1;\,1]$, їх можна подати в такому вигляді

$$\left\{T_\rho(\xi),\,S_{\rho\lambda}(\xi)\right\}=\frac{1}{\sqrt{1-\xi^2}}\left\{\Psi_1(\xi),\,\Psi_2(\xi)\right\};\quad \left\{\tilde{N}(\xi),\,\tilde{Q}(\xi),\,\tilde{L}_b(\xi)\right\}=\sqrt{1-\xi^2}\left\{\Psi_3(\xi),\,\Psi_4(\xi),\,\Psi_5(\xi)\right\}. \quad (15)$$

Тут $\Psi_1(\xi)$, $\Psi_2(\xi)$, $\Psi_3(\xi)$, $\Psi_4(\xi)$, $\Psi_5(\xi)$ – обмежені та неперервні на $[-1;\,1]$ функції.

Побудуємо для них інтерполяційні поліноми Лагранжа, вибравши за вузли інтерполяції корені многочлена Чебишова першого роду $\varphi_n=\frac{2n-1}{2M_0}\pi$ порядку M_0 [14]

$$\left\{\Psi_1(\xi),\,\Psi_2(\xi),\,\Psi_3(\xi),\,\Psi_4(\xi),\,\Psi_5(\xi)\right\}=\sum_{n=1}^{M_0}\left\{A_n^{(1)},\,A_n^{(2)},\,A_n^{(3)},\,A_n^{(4)},\,A_n^{(5)}\right\}\Phi(\psi,\varphi_n), \quad (16)$$

в яких введено позначення

$$\Phi(\psi,\varphi_n)=\frac{(-1)^{n+1}\cos M_0\psi\sin\varphi_n}{M_0(\cos\psi-\cos\varphi_n)};\quad \cos\psi=\xi;\quad \cos\varphi=s;\quad \varphi,\,\psi\in[0;\,\pi];\quad A_n^{(1)},\ldots,A_n^{(5)}$$ – довільні сталі.

Використовуючи властивість $\Phi(\varphi_n,\,\varphi_n)=1$, знаходимо у вузлах інтерполяції

$$\left\{T_\rho(\lambda_k),\,S_{\rho\lambda}(\lambda_k),\,\tilde{N}(\lambda_k),\,\tilde{Q}(\lambda_k),\,\tilde{L}_b(\lambda_k)\right\}=\left\{\frac{A_k^{(1)}}{\sin\psi_k},\,\frac{A_k^{(2)}}{\sin\psi_k},\,A_k^{(3)}\sin\psi_k,\,A_k^{(4)}\sin\psi_k,\,A_k^{(5)}\sin\psi_k\right\};$$

$$\frac{d}{d\lambda}\left\{\tilde{N}(\xi),\,\tilde{Q}(\xi),\,\tilde{L}_b(\xi)\right\}_{\lambda=\lambda_k}=-\frac{1+a_0^2\cos\psi_k}{2a_0\sin\psi_k}\sum_{n=1}^{M_0}\left\{A_n^{(3)}\sin\varphi_n,\,A_n^{(4)}\sin\varphi_n,\,A_n^{(5)}\sin\varphi_n\right\}a_{nk}, \quad (17)$$

де $a_{nk} = \dfrac{\cos\varphi_n}{2\sin\varphi_n}$ при $k = n$; $a_{nk} = \dfrac{(-1)^{n+k}\sin\psi_k}{\cos\varphi_n - \cos\psi_k}$ при $k \neq n$; $\psi_k = \dfrac{2k-1}{2M_0}\pi$.

Регулярні інтеграли від функцій $T_\rho(\lambda)$, $S_{\rho\lambda}(\lambda)$, $\tilde{N}(\lambda)$, $\tilde{Q}(\lambda)$, $\tilde{L}_b(\lambda)$ визначаються за квадратурними формулами Гаусса [14]

$$\frac{1}{\pi}\int_{-\alpha_0}^{\alpha_0}\left\{T_\rho(t),\ \tilde{N}(t)\right\}F(\lambda_k,t)dt = \frac{2}{M_0}\sum_{n=1}^{M_0}\left\{\frac{A_n^{(1)}}{\sin\varphi_n},\ A_n^{(3)}\sin\varphi_n,\ \right\}F(\lambda_k,t_n)\frac{a_0\sin\varphi_n}{1+a_0^2\cos^2\varphi_n}. \quad (18)$$

Тут $F(\lambda,t)$ – регулярна на $[-1;\ 1]$ функція.

Для обчислення сингулярних інтегралів з ядрами Гільберта у вузлах інтерполяції $\lambda = \lambda_k$ використаємо квадратурну формулу [9, 12, 13]

$$\frac{1}{\pi}\int_{-\alpha_0}^{\alpha_0}T_\rho(t)F(\lambda_k,t)\operatorname{ctg}\frac{\lambda_k - t}{2}dt = \frac{2}{M_0}\sum_{n=1}^{M_0}\frac{A_n^{(1)}}{\sin\varphi_n}F(\lambda_k,t_n)\left[\frac{a_0^2\cos\varphi_n\sin\varphi_n}{1+a_0^2\cos^2\varphi_n} - \frac{\sin\varphi_n}{\sin\psi_k}\operatorname{ctg}\frac{\psi_k + (-1)^{n+k}\varphi_n}{2}\right]. \quad (19)$$

Інтеграли зі змінною верхньою межею визначаються за формулою трапецій.

Підставляючи співвідношення (17)-(19) в систему (7), (11), (13) та порівнюючи ліві та праві частини рівнянь у вузлах інтерполяції (колокації), одержимо систему лінійних алгебраїчних рівнянь для визначення сталих $A_n^{(1)}$, $A_n^{(2)}$, $A_n^{(3)}$, $A_n^{(4)}$, $A_n^{(5)}$ та N_0, L_b^0. Якщо ці сталі стануть відомі, то шукані функції у вузлах колокації визначаються за формулами (17). Нормальні напруження в зовнішньому і внутрішньому поздовжніх волокнах ребра знаходимо за законом Гука в його одновимірній формі, а найбільші дотичні напруження в осьовому волокні – за формулою Журавського [2]

$$\sigma^{(1)} = \frac{1}{F_0}\left[N + \frac{\eta+\eta_c}{\eta_c}\frac{L_b}{\rho}\right];\quad \sigma^{(2)} = \frac{1}{F_0}\left[N + \frac{\eta_c-\eta}{\eta_c}\frac{L_b}{\rho-2\eta}\right],\quad \tau_{\max} = \frac{3}{2}\frac{Q}{F_0}.$$

Для прикладу досліджено напружений стан на контурі еліптичного ($\varepsilon = \pm 0.2$) отвору в пластинці та підсилювальному ребрі з такими фізико-геометричними параметрами:

$$\alpha_0 = \frac{2\pi}{3};\quad \frac{h_0}{h} = \frac{4}{3};\quad \frac{\eta}{R_0} = 0.05;\quad \frac{\sqrt{E_x E_y}}{E_0} = 5.$$

Результати розрахунку величин T_ρ, $S_{\rho\lambda}$, T_λ, $\sigma^{(1)}$, $\sigma^{(2)}$, $\tau_{\max}$ при $p = 0$, $q = q$, $M_0 = 171$ ілюструються на рис. 3–8. Характеристики ортотропних матеріалів і лінії, які відповідають цим матеріалам на рисунках, наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Матеріал пластинки	β_1	β_2	ν_x	E_x/E_y	Лінії
ізотропний матеріал	1	1	0.300	1	————
скло-епоксид	2.2712	0.7626	0.250	3	— — — — -
графіт-епоксид	6.9992	0.7144	0.250	25	— · — · — · -
епоксид-скло	0.4400	1.3100	0.083	1/3	.....
епоксид-графіт	0.1430	1.4010	0.010	1/25	— . . — . . —

Аналізуючи одержані результати, приходимо до таких **висновків**:

- у результаті числових експериментів встановлено, що вплив деформацій поперечного зсуву в підсилювальному ребрі на розподіл напружень у пластинчастій конструкції незначний і ним можна знехтувати в інженерних розрахунках;

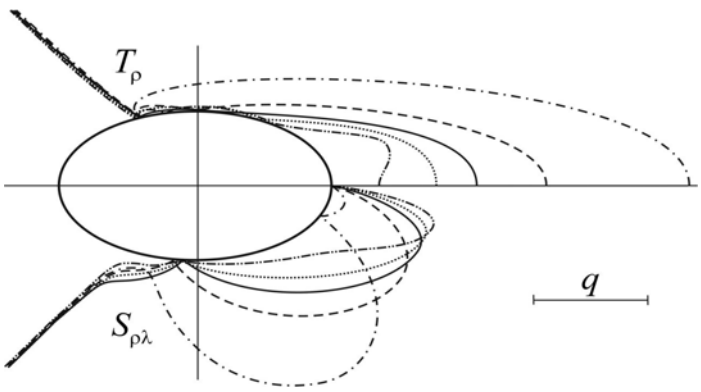


Рис. 3. Епюри розподілу контактних зусиль на контурі Г в пластинці ($\varepsilon = 0.2$)

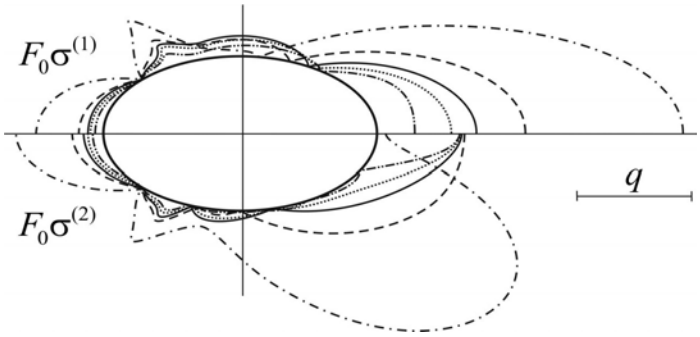


Рис. 4. Епюри розподілу нормальних напружень в крайніх волокнах підсилювального ребра ($\varepsilon = 0.2$)

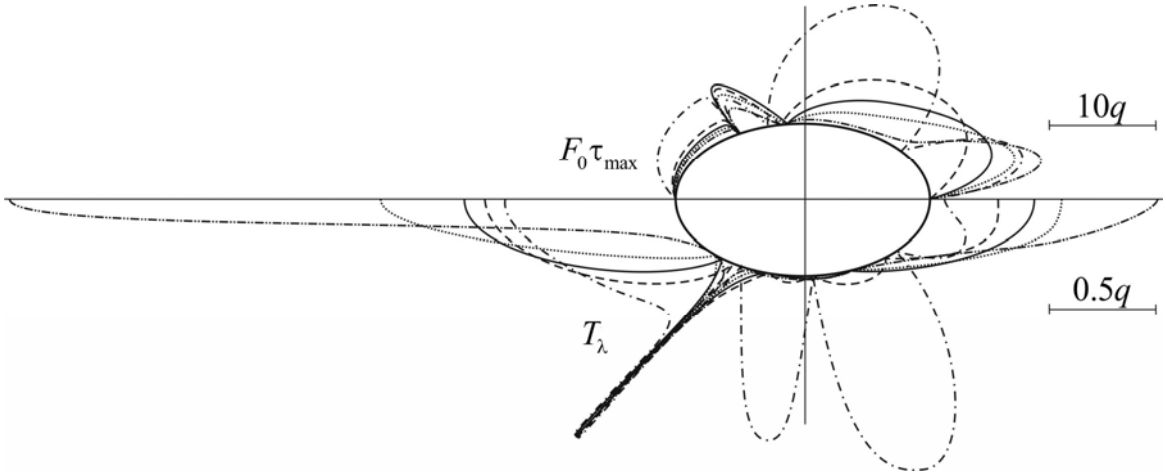


Рис. 5. Епюри розподілу максимальних дотичних напружень в осьовому волокні підсилювального ребра і кільцевих зусиль на контурі Γ в пластинці ($\varepsilon = 0.2$)

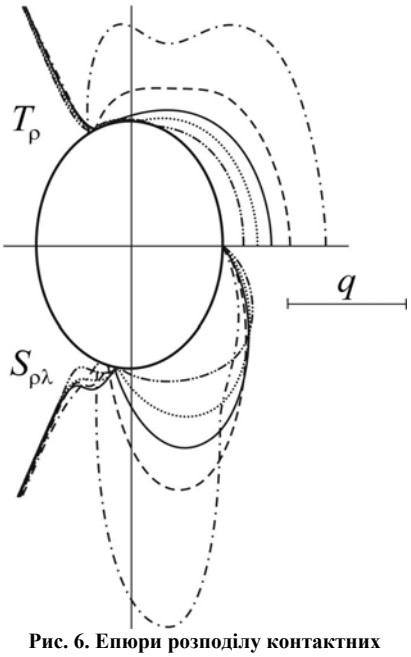


Рис. 6. Епюри розподілу контактних зусиль на контурі Γ в пластинці ($\varepsilon = -0.2$)

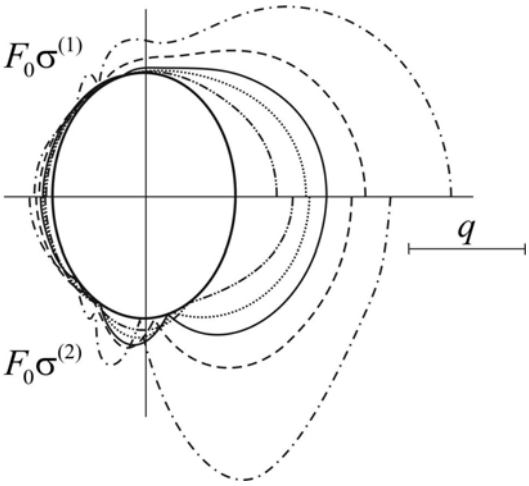


Рис. 7. Епюри розподілу нормальних напружень в крайніх волокнах підсилювального ребра ($\varepsilon = -0.2$)

- ортотропія матеріалу пластинки, незалежно від форми отвору, суттєво впливає на всі розрахункові величини; так, при збільшенні E_x / E_y максимальні значення T_ρ, $S_{\rho\lambda}$, $\sigma^{(1)}$, $\sigma^{(2)}$, τ_{max} різко зростають; для кільцевих зусиль T_λ спостерігається обернена залежність;
- наявність підсилювального ребра дозволяє суттєво зменшити максимальні значення T_λ; так, при розтягу пластинки вздовж малої осі еліпса і підсилення ділянки з найбільшою кривиною максимальні значення T_λ для матеріалу епоксид-графіт зменшуються в 3.06 разу;
- запропонований метод без особливих змін можна перенести на випадок, коли сполучення пластинки і ребра здійснено методом зварювання.

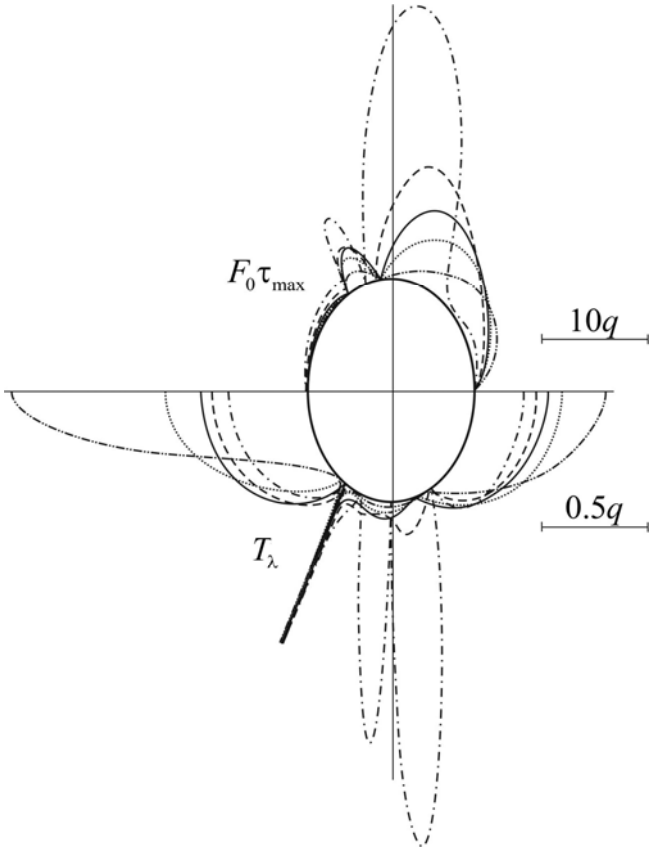


Рис. 8. Епюри розподілу максимальних дотичних напружень в осьовому волокні підсилювального ребра і кільцевих зусиль на контурі Г в пластинці ($\varepsilon = -0.2$)

Література

1. Мартынович Т.Л. Контактные взаимодействия пластин с упругими элементами / Т.Л. Мартынович, В.Е. Юринец. – Львов : Высшая школа. Изд-во при Львов. ун-те, 1984. – 160 с.
2. Писаренко Г.С. Опір матеріалів / Г.С. Писаренко, О.Л. Квітка, Є.С. Уманський. – Київ : Вища школа, 2004. – 655 с.
3. Шереметьев М.П. Пластинки с подкрепленным краем / М.П. Шереметьев. – Львов : Издательство Львовского университета, 1960. – 258 с.
4. Филин А.П. Алгоритмы построения разрешающих уравнений механики стержневых систем / А.П. Филин, О.Д. Тананайко, И.М. Чернева, М.А. Шварц. – Ленинград : Стройиздат, 1983. – 232 с.
5. Божидарнік В.В. Механіка руйнування, міцність і довговічність неперервно армованих композицій. Т. 2. Математичні методи в задачах неперервно армованих композитів / В.В. Божидарнік, О.Є. Андрейків, Г.Т. Сулим. – Луцьк : Надстир′я, 2007. – 410 с.
6. Сяський А.О. Міжфазна тріщина в нескінченній ізотропній пластинці з підкріпленим круговим отвором / А.О. Сяський, Н.В. Шевцова, О.Ю. Дейнека // Вісник Національного університету водного господарства і природокористування. Серія «Технічні науки». – 2017. – Вип. 4 (80). – С. 168–176.
7. Сяський А.О. Міжфазний розріз в ортотропній пластинці з підсиленим круговим отвором / А.О. Сяський, Н.В. Шевцова, О.Ю. Дейнека // Вісник Хмельницького національного університету. – 2018. – № 5 (265). – С. 176–181.
8. Лехницкий С.Г. Анизотропные пластинки / С.Г. Лехницкий. – Москва : Гостехиздат, 1957. – 464 с.
9. Сяський А.О. Передача сил до криволінійного отвору нескінченної ортотропної пластинки стрижнями змінної жорсткості / А.О. Сяський, Ю.В. Батишкіна // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – 2004. – Т. 9, № 4. – С. 5–11.
10. Сяський А. Застосування методу сил для статичного розрахунку замкнених криволінійних стрижнів / А. Сяський, Н.Шевцова // Вісник Тернопільського національного технічного університету. – 2015. – Т. 79, № 3. – С. 24–30.
11. Мусхелишвили Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости / Н.И. Мусхелишвили. – Москва : Наука, 1966. – 708 с.
12. Сяський А.А. Напряженное состояние кусочно-однородной пластинки с упругим включением / А.А. Сяський, В.А. Сяський // Прикладная механика. – 1983. – Т. 19, № 5. – С. 94–99.
13. Сяський А.А. Упругое равновесие пластинки с частично подкрепленным криволинейным отверстием / А.А. Сяський // Прикладная математика и механика. – 1986. – Т. 50, № 2. – С. 247–254.

14. Каландия А.И. Математические методы двумерной упругости / А.И. Каландия. – Москва : Наука, 1973. – 304 с.

References

1. Martynovich T.L. Kontaktnye vzaimodejstvija plastin s uprugimi jelementami / T.L. Martynovich, V.E. Jurinec. – L'vov : Vysshaja shkola. Izd-vo pri L'vov. un-te, 1984. – 160 s.

2. Pysarenko H.S. Opir materialiv / H.S. Pysarenko, O.L. Kvitka, Ye.S. Umanskyi. – Kyiv : Vyshcha shkola, 2004. – 655 s.

3. Sheremet'ev M.P. Plastinki s podkreplennym kraem / M.P. Sheremet'ev. – L'vov : Izdatel'stvo L'vovskogo universiteta, 1960. – 258 s.

4. Filin A.P. Algoritmy postroenija razreshajushhih uravnenij mehaniki sterzhnevyh sistem / A.P. Filin, O.D. Tananajko, I.M. Cherneva, M.A. Shvarc. – Leningrad : Strojizdat, 1983. – 232 s.

5. Bozhydarnik V.V. Mekhanika ruinuvannia, mitsnist i dovhovichnist neperervno armovanykh kompozytsii. T. 2. Matematychni metody v zadachakh neperervno armovanykh kompozytiv / V.V. Bozhydarnik, O.Ie. Andreikiv, H.T. Sulym. – Lutsk : Nadstyr□ia, 2007. – 410 s.

6. Siaskyi A.O. Mizhfazna trishchyna v neskinchennii izotropnii plastyntsi z pidkriplenym kruhovym otvorom / A.O. Siaskyi, N.V. Shevtsova, O.Iu. Deineka // Visnyk Natsionalnoho universytetu vodnoho hospodarstva i pryrodokorystuvannia. Seriia «Tekhnichni nauky». – 2017. – Vyp. 4 (80). – S. 168–176.

7. Siaskyi A.O. Mizhfaznyi rozriz v ortotropnii plastyntsi z pidsylenym kruhovym otvorom / A.O. Siaskyi, N.V. Shevtsova, O.Iu. Deineka // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2018. – № 5 (265). – S. 176–181.

8. Lehnickij S.G. Anizotropnye plastinki / S.G. Lehnickij. – Moskva : Gostehizdat, 1957. – 464 s.

9. Siaskyi A.O. Peredacha syl do kryvoliniinoho otvoru neskinchennoi ortotropnoi plastynky stryzhniamy zminnoi zhorstkosti / A.O. Siaskyi, Yu.V. Batyshkina // Visnyk Ternopilskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu. – 2004. – T. 9, № 4. – S. 5–11.

10. Siaskyi A. Zastosuvannia metodu syl dlia statychnoho rozrakhunku zamknenykh kryvoliniinykh stryzhniv / A. Siaskyi, N.Shevtsova // Visnyk Ternopilskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu. – 2015. – T. 79, № 3. – S. 24–30.

11. Mushelishvili N.I. Nekotorye osnovnye zadachi matematicheskoj teorii uprugosti / N.I. Mushelishvili. – Moskva : Nauka, 1966. – 708 s.

12. Sjas'kij A.A. Naprjazhennoe sostojanie kusochno-odnorodnoj plastinki s uprugim vkljucheniem / A.A. Sjas'kij, V.A. Sjas'kij // Prikladnaja mehanika. – 1983. – T. 19, № 5. – S. 94–99.

13. Sjas'kij A.A. Uprugoe ravnovesie plastinki s chastichno podkreplennym krivolinejnym otverstiem / A.A. Sjas'kij // Prikladnaja matematika i mehanika. – 1986. – T. 50, № 2. – S. 247–254.

14. Kalandija A.I. Matematicheskie metody dvumernoj uprugosti / A.I. Kalandija. – Moskva : Nauka, 1973. – 304 s.

Рецензія/Peer review : 12.11.2018 р. Надрукована/Printed :15.2.2019 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Бомба А.Я.

DOI 10.31891/2307-5732-2019-269-1-40-45
УДК 343.98:343.344

А.Л. ГАНЗЮК, О.В. КРАВЧУК, А.І. ГОРДЄЄВ, В.В. ГРЕБЕЛЬСЬКИЙ, О.О. КУДИНОВ
Хмельницький НДЕКЦ МВС України

СПЕЦІАЛЬНИЙ ПРИСТРІЙ ДЛЯ ДИСТАНЦІЙНОГО ПРИВЕДЕННЯ В ДІЮ РУЧНИХ ОСКОЛОЧНИХ ГРАНАТ ТА ЇХ ПІДРИВНИКІВ ІЗ ДОСЯГНЕННЯМ МІНІМАЛЬНОГО РИЗИКУ ДЛЯ ЖИТТЯ ВИБУХОТЕХНІКІВ

Проаналізовано існуючі конструкції пристроїв для знищення вибухових пристроїв та виявлено їх недоліки. Запропоновано конструкцію спеціального пристрою для приведення в дію ручних осколочних гранат та їх підривників без негативного впливу факторів вибуху на елементи конструкції пристрою із досягненням мінімального ризику для життя вибухотехніків. Розглянуто особливості проектування основних вузлів пристрою. Наведено результати експериментальних підривань гранат і підривників та встановлено високу безпечну ефективність роботи пристрою та зберігання пристрою від руйнації його елементів від дії вражаючих факторів вибуху.

Ключові слова: вибухові пристрої, установки для знищення вибухових пристроїв, вибухотехнічні дослідження.

A.L. HANZYUK, O.V. KRAVCHUK, A.I. HORDEEV, V.V. HREBELSKY, O.O. KUDINOV
Khmelnytsky NDECTS of the MIA of Ukraine

SPECIAL DEVICE FOR DISTANCE ADJUSTMENT TO MANUAL BROWN GRAINS AND ITS SUBSIDIARIES WITH MINIMUM RISK ACHIEVEMENT FOR LIFE OF EXPLOSIVE MECHANICS

The current state of destruction of explosive devices for industrial and military purposes is considered. The existing designs of devices for destruction of explosive devices are analysed and their drawbacks are revealed. The construction of a special device for actuating manual splinter grenades and their blowers without the negative influence of explosion factors on the elements of the device design with the achievement of the minimum risk for the life of the explosives is proposed. The principle of his work is given. Features of the design of the main units of the device are considered. The results of experimental exploration of grenades and blasters are shown, and the high safety performance of the device, simplicity of operation, maintenance and storage of the device from the destruction of its elements from the impact of the damaging factors of the explosion is established.

Key words: explosive devices, installations for destruction of explosive devices, explosion investigation.

Вступ

Вибух, як спосіб вчинення злочинів став набуватиме дедалі більшого поширення, зростаючий технічний рівень розвитку населення сприяв виготовлення саморобних вибухових пристроїв, в країні різко збільшувалися масштаби нелегального обігу зброї, боєприпасів, вибухових речовин. Вибухи мають фізичну або хімічну природу і в залежності від цього проводяться різноманітні дослідження і призначається чи технічна експертиза або вибухотехнічна.

Всі дозвільні питання криміналістичної вибухотехніки охоплюються двома видами досліджень. Один з них здійснюються особами, що роблять розслідування в рамках проведення окремих слідчих дій, інший вимагає наявності спеціальних знань і проводяться експертами-вибухотехніками. Криміналістична вибухотехніка вивчає різні об'єкти та розробляє науково-технічні прийоми і методи не тільки для ідентифікаційних цілей, але й для встановлення інших елементів механізму протиправного посягання (предмета, знаряддя, жертви і т.п.). Крім того, вона спрямована не тільки на розкриття і розслідування злочинів, але й на запобігання суспільно небезпечних діянь, вчинених з використанням вибухових пристроїв.

Вибухові пристрої – це промислові, кустарні та саморобні вироби одноразового застосування, в конструкції яких передбачено створення уражаючих факторів або виконання корисної роботи за рахунок енергії хімічного вибуху заряду вибухової речовини або суміші. У загальному вигляді вибуховий пристрій може складатися з таких компонентів: заряд вибухової речовини, засіб підриву (детонатор), механізм проведення в дію (датчик цілі), корпус та матеріали які маскують (пакети, коробки тощо).

Механізми приведення детонатора в дію механічного принципу можуть бути в свою чергу розділені на: обривні, натискні, розвантажувальні та натяжні. Вибухові пристрої діляться за технологією виготовлення на: промислові, кустарні та саморобні. У свою чергу вибухові пристрої промислового виготовлення поділяються на військового (гранати, гранатомети, снаряди, міни) та господарського призначення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Питання, пов’язані з окремими аспектами розслідування злочинів, учинених із застосуванням вибухових пристроїв (огляд місця події, виявлення, огляд, вилучення і знешкодження вибухових пристроїв, призначення експертиз вибухових пристроїв, обставин і механізму вибуху), досліджували у своїх працях А.Ю. Аполонов, І.І. Артамонов, М.І. Асташов, Л.В. Бертовський, Т.М. Бульба, В.П. Власов, Ю.М. Дільдін, А.М. Єгоров, З.І. Кірсанов, В.В. Мартинов, М.А. Михайлов, І.Д. Моторний, І.П. Пантелєєв, В.В. Поліщук, В.А. Ручкін, А.Ю. Семенов, Є.Н. Тихонов та інші вчені криміналісти.

Однак поза увагою вчених залишилися питання щодо створення нових спеціалізованих

конструкцій пристроїв для проведення вибухотехнічних досліджень з метою відповіді на питання про придатність вибухових пристроїв до вибуху.

Відомі способи та конструкції засобів для утилізації боєприпасів та вибухонебезпечних предметів які відносяться до галузі військової техніки і можуть бути використані для експериментального відпрацювання вибухових пристроїв, до складу яких можуть входити екологічно небезпечні високотоксичні речовини. Відома вибухозахисна камера для забезпечення безпеки при транспортуванні, ліквідації та експериментальної відпрацювання вибухових пристроїв, у склад яких можуть входити екологічно небезпечні високотоксичні речовини. Камера містить корпус, що складається з циліндричної частини і двох плоских днищ з конічними переходами. В кожному дні є завантажувальний отвір з горловиною; днища складаються з внутрішньої і зовнішньої плит, герметично жорстко з'єднаних між собою, в яких є отвори для установки прохідних елементів експлуатаційного призначення. На внутрішній поверхні циліндричної частини і силових кришках встановлено протиосколковий захист, виконаний у вигляді шарів металевої сітки. У верхній частині порожнини камери встановлена поздовжня балка з кареткою для установки вибухового пристрою.

Відомо пристрій для локалізації вибухонебезпечних предметів. Він містить одну або більше заповнених диспергентом ємностей, обмежених еластичною оболонкою, і проти осколковий екран, закріплений по зовнішньому контуру. Протиосколковий екран виконаний гофрованим з гофрами, рівномірно розподіленими по периметру. Складки гофри виконані в двох напрямках, що перетинаються під кутом від 60 до 120°. Протиосколковий екран дозволяє реалізувати достатню ступінь деформації оболонки, задану рівнем еластичності матеріалу, що призводить до підвищення захисних характеристик по фугасній дії.

Відома установка для знищення детонаторів рис. 1 [1], що містить блок нагрівання, пристрій для завантаження та розвантаження, джерело регулювання живлення, датчики контролю детонації та завантаження і вивантаження, блок логіки. Недоліками даної установки для знищення детонаторів є тривалий період часу і складність її завантаження та розвантаження, додаткове джерело енергії для розігріву детонаторів, а також вплив на елементи конструкції установки вибухової хвилі та осколків.

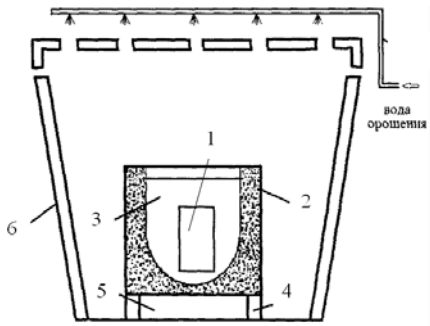


Рис. 1. Схема пристрою знищення вибухонебезпечних предметів: 1 – боєприпаси; 2 – резервуар; 3 – вода; 4 – зборка; 5 – повітряний зазор; 6 – камера підривання

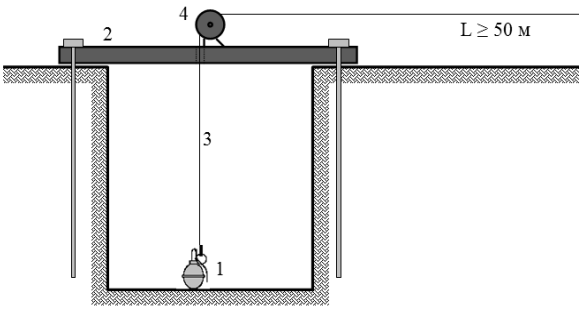


Рис. 2. Схема дистанційного приведення в дію ручної гранати: 1 – ручна граната; 2 – станина; 3 – привідний тросик; 4 – обвідний ролик

Відомий пристрій для дистанційного підриву гранат рис. 2 [2], що містить станину на якій розташовано кронштейн з обвідним роликом для руху привідного тросика, який приєднано до кільця чеки підривника гранати, та розміщено над колодязем. Граната з привідним тросиком, пропущеним через обвідний ролик, встановлюється на дні колодязя. До вад відомого пристрою відноситься те, що при спрацюванні пристрою для дистанційного підриву гранат вибухова хвиля та осколки наносять пошкодження станині та блоку обвідного ролика і не повністю присутні безпечні умови підривання.

Актуальність дослідження

Метою роботи є створення конструкції спеціального обладнання для забезпечення дистанційного приведення в дію ручних осколочних гранат та їх підривників без негативного впливу факторів вибуху на елементи конструкції пристрою та досягнення мінімального ризику для життя вибухотехніків. Дослідження, що спрямовані на пошуки новітніх конструктивних рішень є актуальною задачею.

Виклад основного матеріалу

Дистанційним способом ручні гранати, які за зовнішніми ознаками не мають пошкоджень та корозії, знищуються при необхідності проведення вибухотехнічних досліджень для відповіді на питання про придатність їх до вибуху. Запропоноване обладнання відноситься до пристроїв для дистанційного приведення в дію вибухових пристроїв, а саме ручних осколочних гранат (Ф-1, РГД-5, РГ-42 РГО, РГН) та підривників (УЗРГМ, УЗРГМ-2, УДЗ) з метою проведення експериментальних підривів. Зменшення ризику, за рахунок вжиття комбінації заходів із забезпечення безпеки на підставі оптимального вибору та застосування спеціального обладнання, завжди передбачає дотримання певної послідовності робіт.

Поставлена задача вирішується тим, що пристрій для дистанційного приведення в дію ручних осколочних гранат та їх підривників [3], який містить металеву раму, а також штирі для кріплення рами до ґрунту, на якій розташовано кутник з тормозним елементом для створення початкового натягу шнура,

кутник з утворенням підтримуючої полки і пазом для встановлення кільця чеки підривника гранати, два двоплечових важеля в опорах, з'єднаних стяжкою, регульована запобіжна рамка, а торець рами встановлюється перед стінкою колодязя, яка направлена у нього під кутом 45^0.

Конструктивні параметри пристрою для дистанційного приведення в дію ручних осколочних гранат з метою забезпечення ефективного скидання гранати у колодязь вибирають з умови:

$$A \le D/2, \tag{1}$$

де A – довжина полки пристрою, мм; D – діаметр гранати, мм.

А конструктивні параметри пристрою для дистанційного приведення в дію підривників вибирають з умови, що підтримуюча полка відсутня: $A = 0$.

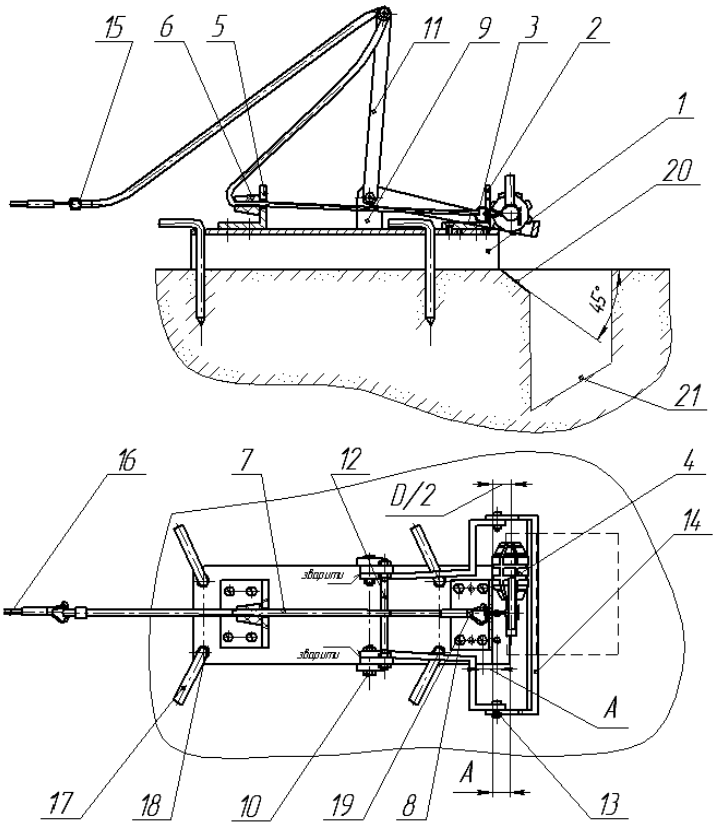


Рис. 3. Схема пристрою для дистанційного приведення в дію ручних осколочних гранат та їх підривників: 1 – рама; 2 – кутник; 3 – кільце чеки підривника; 4 – граната; 5 – кутник; 6 – тормозний елемент; 7 – шнур; 8 – гвинти; 9 – опори; 10 – осі; 11– двоплечовий важіль; 12 – стяжка; 13 – болти; 14 – запобіжна рамка; 15 – карабін; 16 – шнур; 17 – штирі; 18 – отвори; 19 – роз'ємний карабін; 20 – стінка колодязя; 21– колодязь

Конструкція пристрою для дистанційного приведення в дію ручних осколочних гранат та їх підривників показана на рис. 3 та рис. 4. Конструкція пристрою для дистанційного приведення в дію ручних осколочних гранат та їх підривників складається із рами 1, на якій розташовано кутник 2 з утворенням полки *A* і пазом для встановлення кільця 3 чеки підривника гранати 4 та кутник 5 з тормозним елементом 6 для створення початкового натягу шнура 7, які закріплені гвинтами 8. До рами приварено дві опори 9 в які на осях 10 встановлено два зварних двоплечових важеля 11, з'єднаних стяжкою 12 та болтами 13 на них закріплено регульовану запобіжну рамку 14. Шнур 7 з'єднаний карабіном 15 з шнуром 16, що приводить в дію. Рама 1 фіксується відносно ґрунту штирями 17, встановленими у отвори 18. Кільце 3 чеки підривника гранати 4 з'єднано роз'ємним карабіном 19 зі шнуром 7, який проходить крізь отвір у кутику 5 та фіксується тормозним елементом 6. Пристрій встановлюється перед стінкою 20 колодязя 21, стінка 20 якого направлена у колодязь 21 під кутом 45^0 (рис. 3).

Працює пристрій наступним чином: рама 1 з кутниками 2,3 та двоплечовим важелем 11 з регульованою запобіжною рамкою 14 і шнуром 7 з тормозним елементом 6 встановлюється перед стінкою 20 та зафіксовується штирями 17 які встановлюються у отвори 18 та заглиблюються у ґрунт.

Двоплечовий важіль 11 знаходиться у положенні, яке показано на рис. 1 та рис. 2, із налаштованою на розмір вибухового пристрою, регульованою запобіжною рамкою 14, яка унеможливлює несанкціоноване випадання у колодязь 21 вибухового пристрою. Кільце 3 чеки підривника гранати 4 подається крізь паз кутника 2 та з'єднується з роз'ємним карабіном 19 шнура 7. Граната 4 розташовується на полці *A* рами 1 та здійснюється попередній натяг шнура 7 з фіксацією його тормозним елементом 6. Вільний кінець шнура 7 заводиться за стяжку 12. Для запобігання неконтрольованого вибуху шнур 16, що приводить в дію, розмотується на безпечну відстань підриву та приєднується карабіном 15 до вільного кінця шнура 7.

Виконується розпрямлення чеки підривника гранати 4. Здійснюється відхід на безпечну відстань. Далі тягнеться шнур 16, що приводить в дію, і шнур 7, який здійснює перекидання двоплечового важеля 11 із регульованою запобіжною рамкою 14 (етапи перекидання двоплечового важеля показано на рис. 5–7).

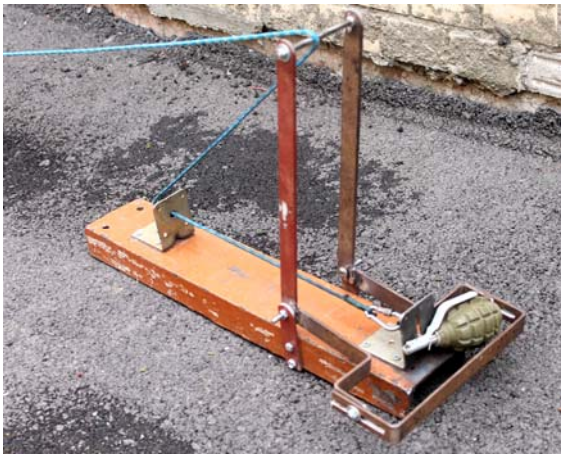


Рис. 4. Налаштування пристрою на певний розмір вибухового об'єкту

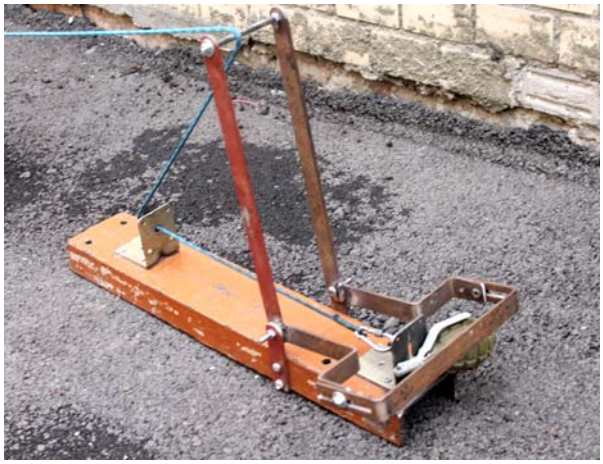


Рис. 5. Початок перекидання двоплечового важеля

Рис. 6. Проміжне положення двоплечового важеля при перекиданні

Рис. 7. Положення важеля перед витягуванням чеки підривника гранати

Подальше витягування шнура 16, що приводить в дію, і шнура 7 призводить до повного витягування чеки підривника гранати 4. Здійснюється ініціювання сповільнювача підривника, а саме в цей час граната 4 скочується по стінці 20 у колодязь 21 – відбувається її підрив. Уражаючи фактори вибуху гранати 4 спрямовуються у стінки колодязя 21 та уверх без руйнівного впливу на елементи пристрою.

Для дистанційного приведення в дію підривників на рамі 1 розташовано ряд отворів з кроком *A* (рис. 3). Проводиться переналаштування кутника 2. Він зміщується на крок *A* та закріплюється за допомогою гвинтів 8 таким чином, що його торець зрівнюється з торцем рами 1. Регульована частина запобіжної рамки 14 налаштовується на розмір підривника осколочної гранати та закріплюється болтами 13. Підривник встановлюється у пристрій і приводиться у дію з тією ж послідовністю, що і граната 4.

При виготовлені пристрою необхідно дотримуватись певних особливостей конструктивних елементів пристрою та їх співвідношень. Конструкція двоплечового важеля (рис. 8) виконується з полоси метала товщиною 4 мм зварним методом з витримуванням певних співвідношень розташування його елементів.

Для стійкого положення важеля на осі при

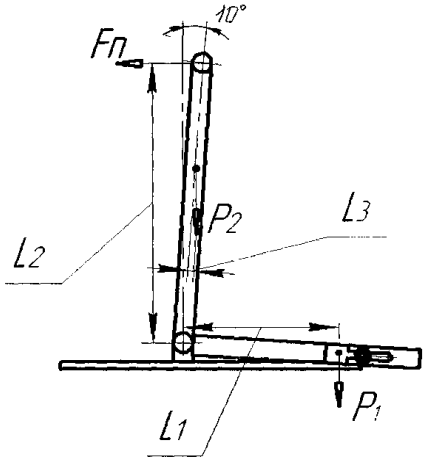


Рис. 8. Схема для визначення параметрів двоплечового важеля: $F_п$ – зусилля витягування шнура для підриву; P_1 – вага важеля із запобіжною регульованою рамкою; P_2 – вага плеча важеля з стяжкою; L_1 – довжина від вісі обертання до центра ваги запобіжної рамки; L_2 – довжина від вісі обертання до вісі стяжки; L_3 – довжина від вісі обертання до центра ваги важеля з стяжкою;

розтягнутому шнурі кут між плечами важелів приймається 10^0, а відстань від центру опори обертання важеля до рами вибирається у межах від 45 до 50 мм.

Співвідношення між параметрами важільної системи вибирають за умовою:

$$F_n \cdot L_2 = P_1 \cdot L_1 + P_2 \cdot L_3, \quad (2)$$

де F_n – зусилля витягування шнура для підриву; P_1 – вага важеля із запобіжною регульованою рамкою; P_2 – вага плеча важеля з стяжкою; L_1 – довжина від вісі обертання до центра ваги запобіжної рамки; L_2 – довжина від вісі обертання до вісі стяжки, L_1/L_2=1/2; L_3 – довжина від вісі обертання до центра ваги важеля з стяжкою.

З метою перевірки працездатності запропонованого пристрою було виготовлено діючу конструкцію пристрою для дистанційного приведення в дію ручних осколочних гранат та їх підривників і були проведені польові експериментальні підриви ручних осколочних гранат та їх підривників, вище вказаних типів.

На рисунках 9 –14 представлено послідовну практичну роботи пристрою.

Рис. 9. Встановлення пристрою з вибуховим об'єктом перед колодязем

Рис. 10. Початок витягування шнура перед перекиданням важеля

Рис. 11. Етап перекидання важеля ти витягування чеки підривника гранати

Рис. 12. Момент ініціювання сповільнювача підривника гранати

Рис. 13. Етапи підривання гранати – початок підриву

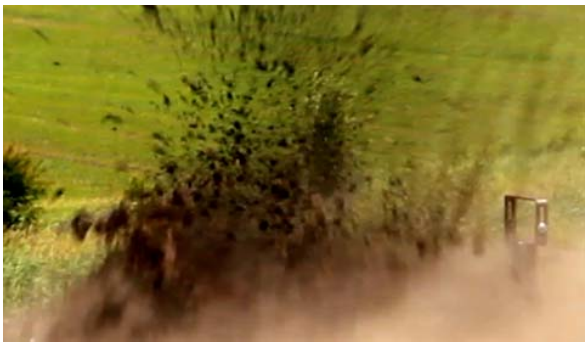


Рис. 14. Етапи підривання гранати – розлітання осколків та ґрунту

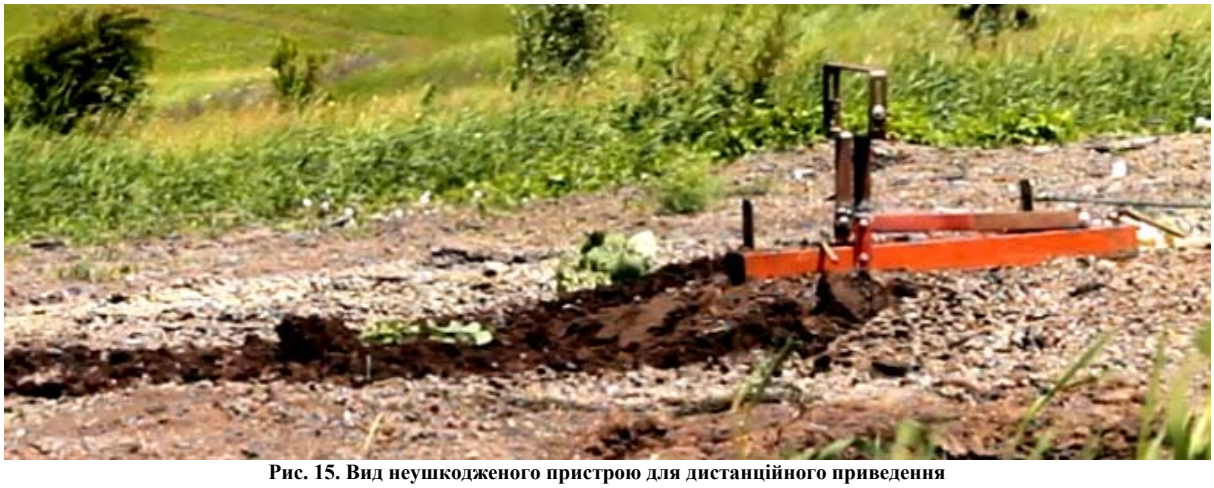


Рис. 15. Вид неушкодженого пристрою для дистанційного приведення в дію ручних осколочних гранат та їх підривників після вибуху

Висновки

Запропоновано конструкцію спеціального пристрою для приведення в дію ручних осколочних гранат та їх підривників без негативного впливу факторів вибуху на елементи конструкції пристрою із досягненням мінімального ризику для життя вибухотехніків та розглянуто особливості проектування основних вузлів пристрою.

В процесі перевірки при проведенні експериментальних підривань гранат та їх підривників встановлено, що експериментальні підриви відбувались безпечно із 100 відсотковим спрацюванням підривання, робота пристрою показала його високу безпечну ефективність, простоту експлуатації і обслуговування та зберігання від руйнації його елементів від дії уражаючих факторів вибуху (рис. 15).

Література

1. Патент RU № 2155319, F42B 3/02. Установка для уничтожения взрывателей / Гнеденко В.В., Данилушкин А.И., Зимин Л.С., Калашников В.В., Мушкаев М.И. (RU). – Заявл. 04.07.1996 ; Опубл. 27.08.2000. – 4 с.

2. Пащенко В.І. Способи знищення боєприпасів методом підриву (СДВ 15.80.) (згармонізовано у відповідності до стандарту ООН IMAS 11.20. Інструкція / В.І. Пащенко, Р.Л. Хомко. – Київ, 2007. – 47 с.

3. Патент на корисну модель № 123069, МПК F42B 3/02. Пристрій для дистанційного приведення в дію ручних осколочних гранат та їх підривників / О.А. Буханченко, О.В. Кравчук, О.П. Марчук, А.В. Зарічний (Україна); – u 2017 08062; Заяв. 02.08.2017; Опубл. 12.02.2018. Бюл. № 3. – 6 с.

References

1. Patent RU № 2155319, F42B 3/02. Ustanovka dlia unychtozhenyia vzгыvatelei / Hnedenko V.V., Danylushkyn A.Y., Zymyn L.S., Kalashnykov V.V., Mushkaev M.Y. (RU). – Zaiavl. 04.07.1996 ; Opubl. 27.08.2000. – 4 c.

2. Pashchenko V.I. Methods of elimination of live ammunitions by the method of injury (SDV 15.80.) (zgarmonizovano in accordance with the standard of UNO IMAS 11.20. Instruction / V.I. Pashchenko, R.L. Khomko. – Kyiv, 2007. – 47 c.

3. Patent na korysnu model № 123069, MPK F42B 3/02. A device is for the controlled from distance adduction in an action of fragment hand-grenades and their pidrivnikiv / O.A. Bukhanchenko, O.V. Kravchuk, O.P. Marchuk, A.V. Zarichnyi (Ukraina); – u 2017 08062; Zaiav. 02.08.2017; Opubl. 12.02.2018. Biul. № 3 – 6 s.

Рецензія/Peer review : 11.11.2018 р. Надрукована/Printed :15.2.2019 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Диха О.В.

DOI 10.31891/2307-5732-2019-269-1-46-52
УДК 621Ф192;621.002.3-419.001.5;656.56:620.193

К.Є. ПОТОПАЛЬСЬКА, О.О. ЛАРІН
Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут"

ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ РЕСУРСУ ЕЛЕМЕНТІВ ТРУБОПРОВОДУ З УРАХУВАННЯМ ПРОЦЕСІВ НАКОПИЧЕННЯ ВТОМИ ТА РОЗВИТКУ КОРОЗІЇ

В даній роботі проводиться аналіз впливу об'ємного поверхневого корозійного дефекту та втомних пошкоджень на надійність коліна магістрального трубопроводу. Для цього було створено параметричну модель трубопроводу з корозійним дефектом, що розвивається стохастично та підпорядковується лог-нормальному закону розподілення. На основі побудованої моделі було проведено серію типових розрахунків для визначення НДС трубопроводу з дефектом, який відповідає різним термінам експлуатації. З використанням отриманих даних для НДС конструкції та розробленої математичної моделі для визначення накопичення втомних пошкоджень отримано параметр пошкоджуваності та ймовірність безвідмовної роботи для конструкції при різному значенні внутрішнього навантаження та з дефектом, який відповідає різним термінам експлуатації.

Ключові слова: корозія, магістральний трубопровід, втома, надійність, стохастичність.

K.E. POTOPALSKA, O.O. LARIN
National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute"

EVALUATION AND FORECASTING OF RESOURCE ELEMENTS OF THE PIPELINE TAKING INTO ACCOUNT THE PROCESSES OF ACCUMULATION OF FATIGUE AND CORROSION DEVELOPMENT

The aim of the research – to analyze of the influence of a volumetric surface corrosion defect and fatigue damage on the reliability of the main pipeline's elbow. The parametric model of defected pipeline was created. Volumetric corrosion defect is modelled as stochastically developing and obeys to the lognormal distribution law. Based on the constructed model, series of typical calculations were conducted for determining the stress-strain state of the pipeline with defect that corresponds to different operation terms. Using the obtained data for the construction stress-strain state and the developed mathematical model for determining the accumulation of fatigue damage, the damage parameter and probability of failure operation for the design at different values of the internal loading and with a defect that corresponds to different terms of operation was received. It has been determined a probability of failure during the operation of a damaged pipeline's elbow with the maximum possible load in all relevant areas.

Key words: corrosion, main pipeline, fatigue, reliability, stochasticity.

Вступ

Магістральні трубопроводи є одним із найбільш поширених засобів транспортування нафти і газу в Світі, який забезпечує високі показники безпеки та економічності. За рахунок того, що зазвичай дані конструкції використовуються довготривало, вони схильні до появи різноманітних дефектів та пошкоджень. Такі пошкодження можуть виникати за рахунок дії агресивного середовища, зокрема при взаємодії з ґрунтом, в якому знаходиться трубопровід, механічних пошкоджень та інше. Одним з найбільш поширених типів є дефекти корозійної природи. Розвиток поверхневих дефектів корозійного типу відбувається випадково, тому процес їх зростання слід розглядати у ймовірнісній постановці. З іншого боку, в наслідок дії циклічного внутрішнього навантаження (пульсації тиску) у трубопроводі відбувається процес накопичення втоми. Дані процеси (поява корозійних дефектів та накопичення втоми) відбуваються одночасно та мають суттєвий вплив на довготривалу міцність трубопроводу. Тому своєчасне діагностування дефектів та прогнозування ресурсу трубопроводу з урахуванням одночасного протікання зазначених процесів є вкрай важливою задачею.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Дослідженню залишкового ресурсу пошкоджених магістральних трубопроводів приділено багато уваги вітчизняними та закордонними вченими. Існуючі дослідження можна умовно поділити на ті, які зосереджені на оцінці залишковій міцності конструкції з дефектом та ті, в яких проведена оцінка накопичення втомних пошкоджень в елементах магістральних трубопроводів. У той же час дослідження накопичення втоми проводяться або експериментально, в даних дослідженнях вивчається поведінка матеріалу з якого вироблено трубопровід на основі досліджень напружено-деформованого стану одновісного зразка [1–3] або циліндричної оболонки [4, 5] та ті, в яких використовуються повні скінчено-елементні моделі для визначання НДС та на основі цих результатів проводиться оцінка накопичення втомних пошкоджень [4, 6].

Наприклад, у роботі [7] досліджено процес накопичення втомних пошкоджень у коліні трубопроводу зі стоншеною стінкою, при чому розглядається конструкція без дії внутрішнього навантаження. Також варто відмітити, роботу, в який досліджується трубопровід з дефектом типу «вм'ятина». В даних роботах проводяться експериментальні та чисельні дослідження.

Необхідно виділити дослідження [1] в якому проводилась оцінка накопичення малоциклової втоми в трубопроводі з одиночним корозійним дефектом. В даній роботі корозійний дефект задавався з постійними розмірами, та не враховувався його розвиток у часі. Оцінка накопичення втомних пошкоджень проводилась з використанням моделі Менсона-Кофіна.

В цілому можна зробити висновок, що розвиток втомних процесів у матеріалі трубопроводу значно впливає на його залишковий ресурс, як і корозійні пошкодження. Тому оцінювати надійність трубопроводу необхідно враховуючи ці обидва процеси.

Метою даної роботи є дослідження впливу об'ємного дефекту корозійної природи, що знаходиться на поверхні криволінійної ділянки трубопроводу, який для різного рівня розвитку заданий статистично та його вплив на залишковий ресурс при відмовах, що викликані багато- та малоцикловою втомою.

Для досягнення мети необхідно розв'язати наступні задачі:

- Створення параметричної моделі коліна трубопроводу з корозійним дефектом з різними розмірами.
- Проведення типових розрахунків для визначення НДС конструкції з дефектом з різними розмірами, які генеруються випадково в залежності від терміну експлуатації.
- З використанням отриманих даних НДС визначити закономірність накопичення параметру пошкоджуваності для трубопроводу з дефектом при експлуатаційному навантаженні.
- Визначити ймовірність безвідмовної роботи коліна трубопроводу з дефектом.

Рішення даних задач можна розділити, як це показано на рис. 1.

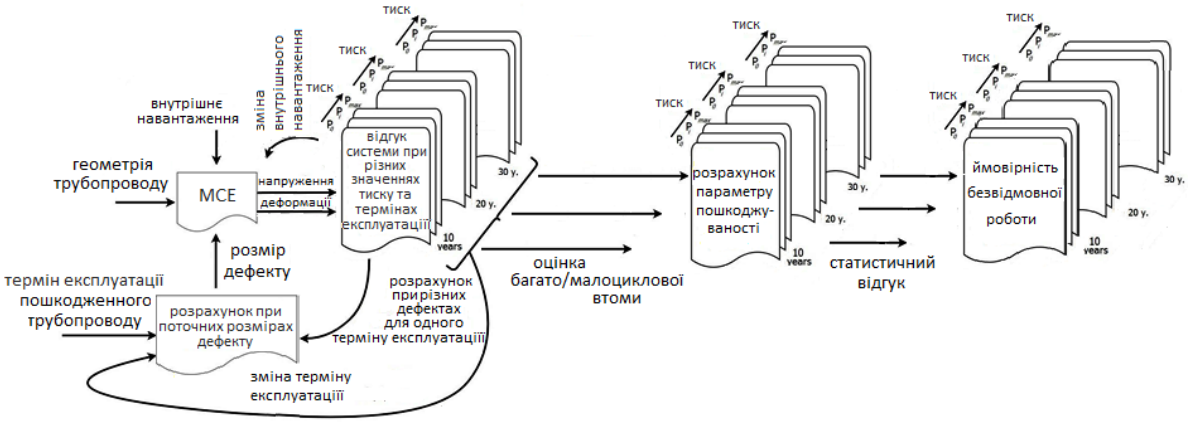


Рис. 1. Структурна схема прогнозування надійності трубопроводу з корозійним дефектом

1. На першому етапі створюється параметрична модель коліна трубопроводу з об'ємним дефектом, що дозволяє автоматично здійснити аналіз деформованого стану конструкції з дефектами різного розміру. Розміри дефекту (глибина, довжина і вага) моделюються з урахуванням відомих статистичних даних можливого розміру пошкодження для такого віку та середовища.

2. На другому етапі, на основі розробленої моделі, було проведено серію розрахунків для різних рівнів навантаження. Для цього було здійснено статичне моделювання трубопроводу з відповідними розмірами дефекту та навантаженням, що змінюється лінійно.

3. Крок 2 повторюється принаймні 150 разів з утворенням різних розмірів дефектів, які ймовірно можуть з'явитися при експлуатації трубопроводу відповідно до аналізованого віку.

4. На наступному етапі збільшується вік дефекту та створюються нові набори трубопроводу з дефектами різного розміру та аналізується їх деформований стан.

5. Дані, які накопичені на етапах 2–4 дають нам статистику концентрації напружень у трубопроводі з корозійним дефектом, що має певний відомий вік зростання.

6. Далі, з використанням оброблених статистичних даних та розробленої математичної моделі для оцінки накопичення втомних пошкоджень проводиться розрахунок параметру пошкодженості для трубопроводу з дефектом різного рівня розвитку та при різних рівнях внутрішнього навантаження.

7. На основі результатів етапу 6 проводиться оцінка надійності трубопроводу з дефектом при різних рівнях внутрішнього навантаження та може буде отримана ймовірність безвідмовної роботи.

Побудова розрахункової моделі. Моделювання трубопроводу

В роботі моделюється фрагмент коліна трубопроводу з урахуванням його криволінійної геометрії, нелінійними властивостями матеріалу та навантаженням, які відповідають стандарту ASME B31G. Модель складається з тороїдальної і циліндричної частин. Для розрахунку було обрано наступні значення розмірів конструкції: зовнішній радіус трубопроводу $D = 508$ мм; товщина стінки $h = 12{,}5$ мм; довжина досліджуваної частини трубопроводу $l = 1{,}5$ м (відповідно до X42 типу трубопроводу). Довжину прямої частини секції труби вибирали апостеріорно після низки попередніх випробувань, коли крайові ефекти в моделі не впливають на деформований стан в досліджуваному перерізі труби. Матеріалом є сталь, властивості якої наведено в таблиці 1.

Ділянку трубопроводу навантажено внутрішнім тиском P і зафіксовано по краях. Для такого типу трубопроводів номінальний (робочій) тиск дорівнює 3 МПа. Також треба зазначити, що при експлуатації з певною частотою буває включення та виключення подачі речовини у трубопровід. При цьому значення внутрішнього тиску може бути більше робочого. Рівень максимального навантаження залежить від області розташування трубопроводу та відповідно до ASME B31.8 (2003) може змінюватися від 6 МПа до 12,8 МПа

(табл. 2), де LC1–LC4 – характерні місця розташування ділянки, що досліджується. Ці зони розподілені таким чином, що LC1 – це зона найвіддаленіша від населених пунктів, і в залежності від наближення до цих населених пунктів максимальне навантаження зменшується. У таблиці 2 LC1-LC4 означають зону розташування (local area) трубопроводу.

Таблиця 1

Властивості матеріалу трубопроводу

Параметр	Модуль пружності	Коефіцієнт Пуассона	Границя плинності	Границя міцності
Позначення	E, ГПа	ν	σ_T, МПа	σ_B, МПа
Значення	205	0.3	290	430

Таблиця 2

Зміна внутрішнього тиску

Область розташування	Типове значення	LLC1	LLC2	LLC3	LLC4
Максимальний тиск, МПа	6	112.8	110.6	88.6	77.1

Моделювання поверхневого дефекту.

Об'ємний поверхневий дефект моделюється в центрі зовнішньої поверхні ділянки коліна трубопроводу (рис. 2). Для дослідження було обрано дефект у формі паралелепіпеду із закругленими границями. Оскільки дефект розташовано на поверхні вигину труби, ескіз був спроектований в локальній тороїдальній системі координат, яка залежить від радіусу коліна трубопроводу R. Геометричні параметри, такі як довжина (d_1), ширина (d_2) та глибина (d_3=h-d), задано параметрично. Це дозволяє автоматично перебудовувати модель залежно від розмірів.

Конкретні розміри дефекту визначаються з аналізу поточного стану його розвитку. Тому в роботі пропонується отримувати розрахункові моделі з дефектом певного рівня розвитку та вивчати залишкову міцність трубопроводу у певний час його експлуатації. З аналізу відомих досліджень можна підсумувати, що зазвичай при оцінці росту дефектів використовують лінійні [8] або нелінійні [8, 9] моделі для кінетики росту корозії.

В даній роботі пропонується враховувати ріст дефекту у часі у вигляді степеневої функції, яка пов'язує час експлуатації та характерний розмір $d_j(t)$ [9]

$$d_j(t) = k(t - t_0)^{\alpha} \ , \tag{1}$$

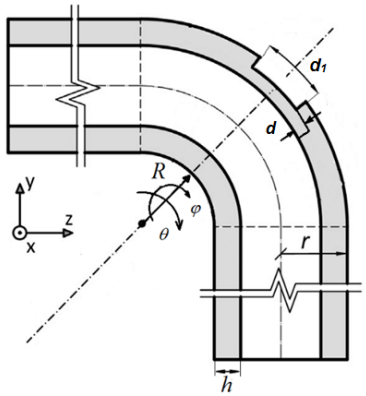


Рис. 2. Ескіз розрахункової моделі

де t_0 – час появи корозійного пошкодження, α та k – це показники кінетики росту пошкоджуваності. З літературних даних та практики експлуатації трубопроводів відомо, що типово за 5 років на поверхні трубопроводу виникають пошкодження корозійного типу. Тому при розрахунках було обрано t_0 = 5 років. Процес розвитку корозії є випадковим, що може бути враховано, якщо показники рівняння кінетики її росту (1): α та k вважати випадковими величинами. Такий підхід широко використовується в літературі. При цьому відомо багато статистичних даних щодо можливих значень параметрів α та k і їх можливої варіації, зокрема і залежно від зовнішніх чинників, а також різних напрямків росту корозійного пошкодження (тобто у глибину та по поверхні у ширину і довжину).

Параметр k здатен суттєво змінюватись, навіть за більш-менш однакових зовнішніх факторах. Параметр α в деяких дослідженнях вважається сталою детермінованою величенною, але є робота, що аналізує його зі статистичної точки зору. Проте його можлива варіація є не суттєвою, тому в даній роботі пропонується вважати параметр α фіксованим та таким, що дорівнює 0,73.

Із статистичних даних відомо, також що розподіл значень розмірів дефекту із достатньою точністю можна вважати підпорядкованим підпорядковується логнормальному закону розподілення

$$f(d_j, t) = \frac{1}{d_j \sigma_j(t)\sqrt{2\pi}} \exp\left[\frac{\left(-\ln d_j - \mu_j(t)\right)^2}{2\sigma_j^2(t)}\right], \tag{2}$$

де $\sigma_j(t)$ та $\mu_j(t)$– це параметри закону, які залежать відповідно до розміру дефекту у поточний час експлуатації та визначаються через співвідношення (1) з коефіцієнту варіації та математичного очікування габаритних розмірів дефекту наступним чином:

$$\mu_j(t) = \ln\left(\frac{m_j(t)}{\sqrt{1 + \frac{\nu_j}{m_j^2(t)}}}\right), \qquad \sigma_j^2(t) = \ln\left(1 + \frac{\nu_j}{m_j^2(t)}\right), \tag{3}$$

$$m_j(t) = \langle d_j(t) \rangle = \langle k_j \rangle (t - t_0)^{\alpha}, \quad \sigma_{d_j}^2(t) = \langle d_j(t)^2 \rangle = \sigma_{k_j}^2 (t - t_0)^{2\alpha}, \nu_j = \frac{\sigma_{d_j}(t)}{m_j(t)} = \frac{\sigma_{k_j}}{k_j} = const \quad (4)$$

де $\langle ... \rangle$ – оператор усереднення, $m_j(t)$ – математичне очікування, ν_j – коефіцієнт варіації. який залежить від часу. На рисунку 2 на схематично зображено розвиток у часі середньої глибини корозійного пошкодження $m_3(t)$ та можливий розкид її значень у часі.

Таблиця 3

Ймовірнісні характеристики габаритних розмірів дефекту

Параметр	Коефіцієнт варіації	Середнє квадратичне відхилення, мм
Довжина	5,2	20
Ширина	2,9	11
Глибина	0,075	0,5

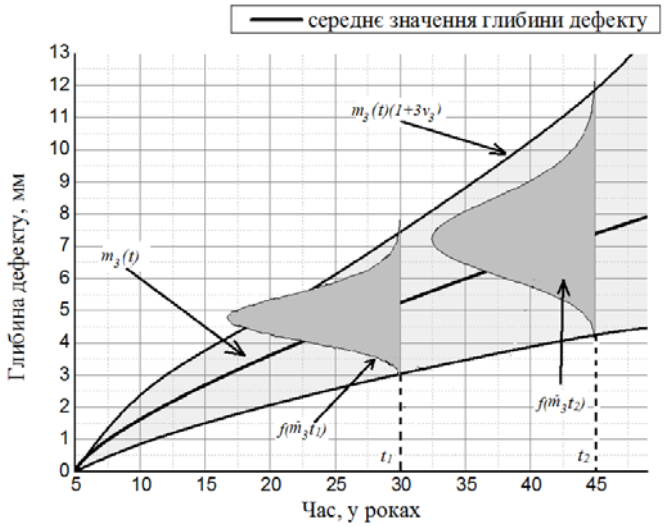


Рис. 3. Графік можливої зміни глибини дефекту у часі та у поточний рік експлуатації

Скінчено-елементна модель

Для визначення НДС криволінійної частини трубопроводу використовували МСЕ. При розрахунках було використано чверть моделі, в якій враховано симетрію трубопроводу.

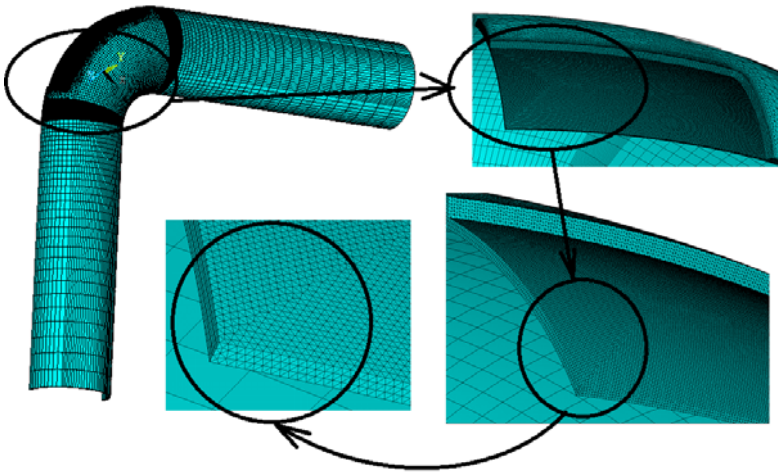


Рис. 4. Сітка чверті коліна трубопроводу

Оцінка НДС конструкції

При створенні сітки враховували особливості моделі. Розмір елемента поступово зменшується при наближенні до зони з пошкодженням. Задано чотири елементи за товщиною. На непошкоджених ділянках трубопроводу будували впорядковану гексагональну сітку, у зоні дефекту – тетраедральну. Використовували ізо-параметричний скінчений елемент з 8-а вузлами та зі 3-а ступенями вільності у вузлі. Сітку усієї моделі та детально поверхневий дефект зображено на рис. 4.

Попередньо було проведено серію розрахунків коліна трубопроводу з середніми розмірами дефекту відповідно до геометричних параметрів, що відповідали різному часу життя пошкодженого трубопроводу

(період від 10 до 45 років). Виявлено, що пластичні деформації у першу чергу з'являються у повздовжньому напрямку пошкодження. Також треба зазначити, що при експлуатації конструкції з фіксованими розмірами дефекту, що до 23 років пластичні деформації починають з'являтись у протилежному напрямку відносно дефекту, тобто у місці найбільшої кривизни. Більш того ці деформації з'являються за великих значень внутрішнього тиску, які не відповідають умовам експлуатації. Таким чином можна зробити висновок, що поверхневий дефект з середніми габаритними розмірами протягом перших 23 років не впливає суттєво на НДС конструкції. На рис. 5 показано при якому навантаженні в конструкції з середніми розмірами дефекту еквівалентні напруження досягають границі плинності та міцності.

На рис. 5 лінією з прямокутними маркерами відображено зміну значення внутрішнього тиску, при якому в конструкції виникають пластичні деформації у відповідний період експлуатації трубопроводу з об'ємним дефектом середніх розмірів. Прямими лініями вказано значення максимального зовнішнього навантаження в залежності від області розташування трубопроводу.

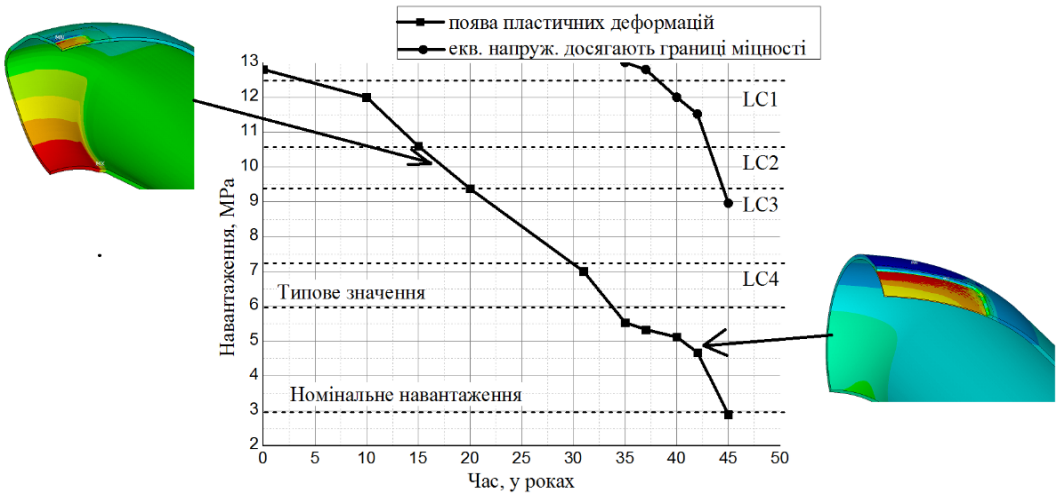
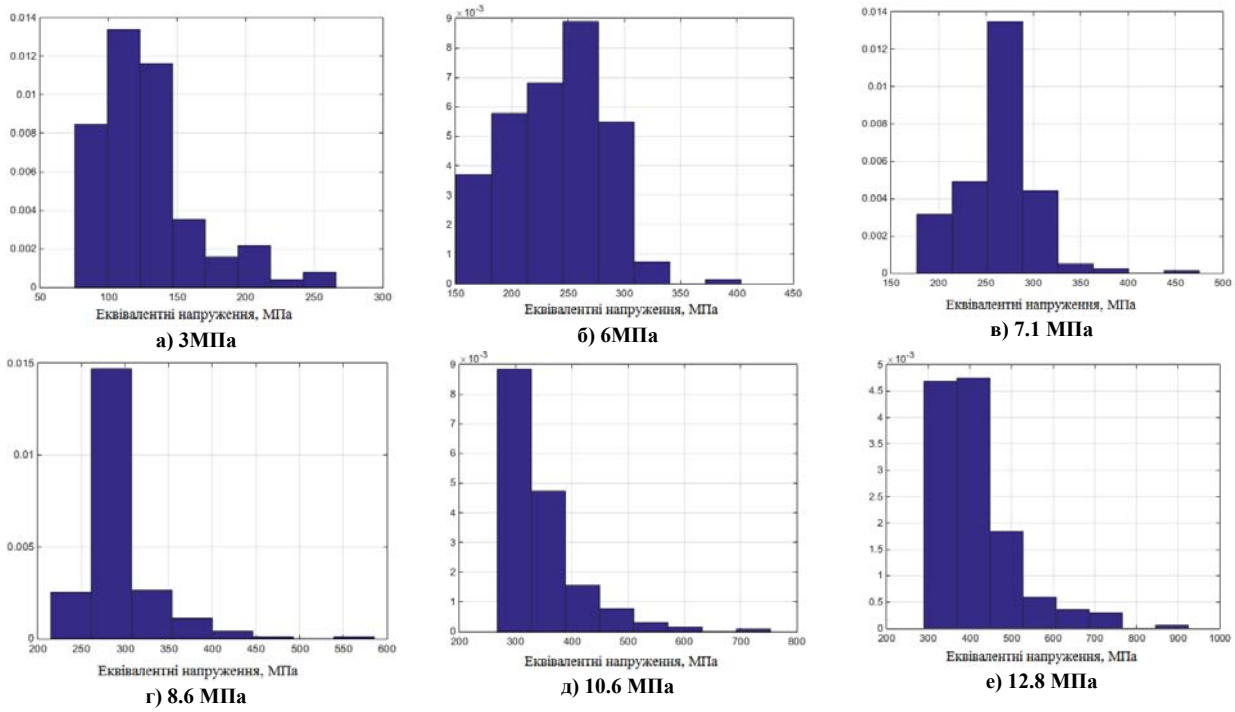


Рис. 5. Значення внутрішнього тиску, що призводить до появи пластичних деформації в конструкції та досягання границі міцності при середніх розмірах об'ємного дефекту



а) 3МПа **б) 6МПа** **в) 7.1 МПа**

г) 8.6 МПа **д) 10.6 МПа** **е) 12.8 МПа**

Рис. 6. Гістограми розподілу максимальних еквівалентних напружень в конструкції з пошкодженням з терміном експлуатації 45 років за різних рівнів навантаження

Виявлено, що у період після 35 років експлуатації у трубопроводі можуть з'являтись пластичні деформації при типовому навантаженні (рис. 4 лінія з прямокутними маркерами). В період експлуатації від 37 років у трубопроводі з відповідним дефектом при дії максимально можливого навантаження виникають напруження, які привішують границю міцності (рис. 4, лінія з круглими маркерами).

Тому подальші дослідження пошкодженого трубопроводу проводилось для періоду експлуатації з 35 до 45 років. Для кожного моменту часу (від 35 до 45 років) було проведено біля 200 розрахунків з випадковими розмірами дефекту, які підпорядковуються логнормальному закону розподілення та мають відповідні відомі ймовірнісні характеристики (3-4).

Для аналізу результатів було обрано 5 вузлів (K,L,H,G,F на рис.6) на конструкції в зоні з дефектом, що знаходяться в типових місцях появи пластичних деформацій, які були виявлені при попередніх дослідженнях.

Після проведених розрахунків отримані ймовірнісні характеристики НДС конструкції при різних рівнях навантаження та у різний термін експлуатації. Отримані дані за еквівалентними напруженнями за критерієм Мізеса, які було статистично оброблено. Сформовані гістограми для різних рівнів навантаження та визначені середні значення, дисперсії та коефіцієнти асиметрії гістограми.

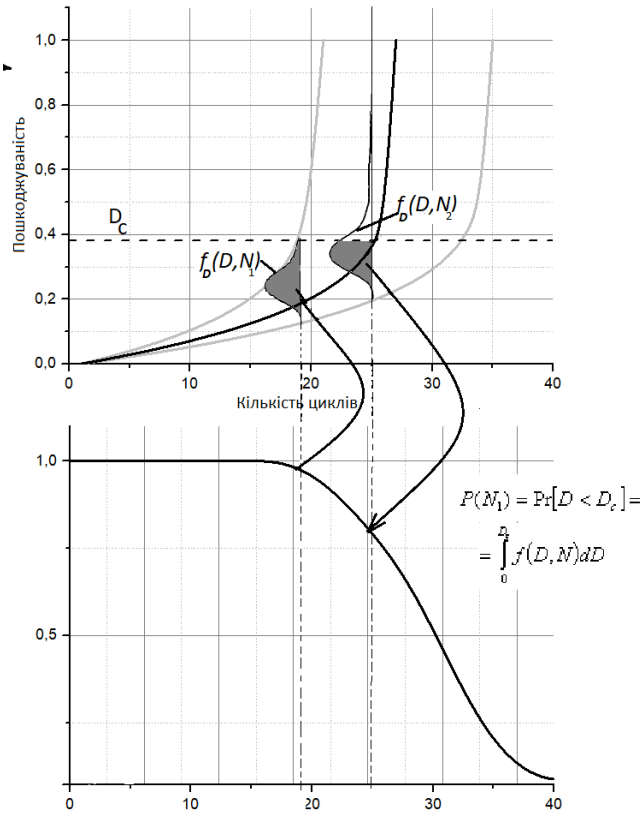


Рис. 7. Визначення ймовірності безвідмовної роботи

На рис. показано схематичне визначення ймовірності безвідмовної роботи за допомогою отриманих результатів для параметру пошкоджуваності (35).

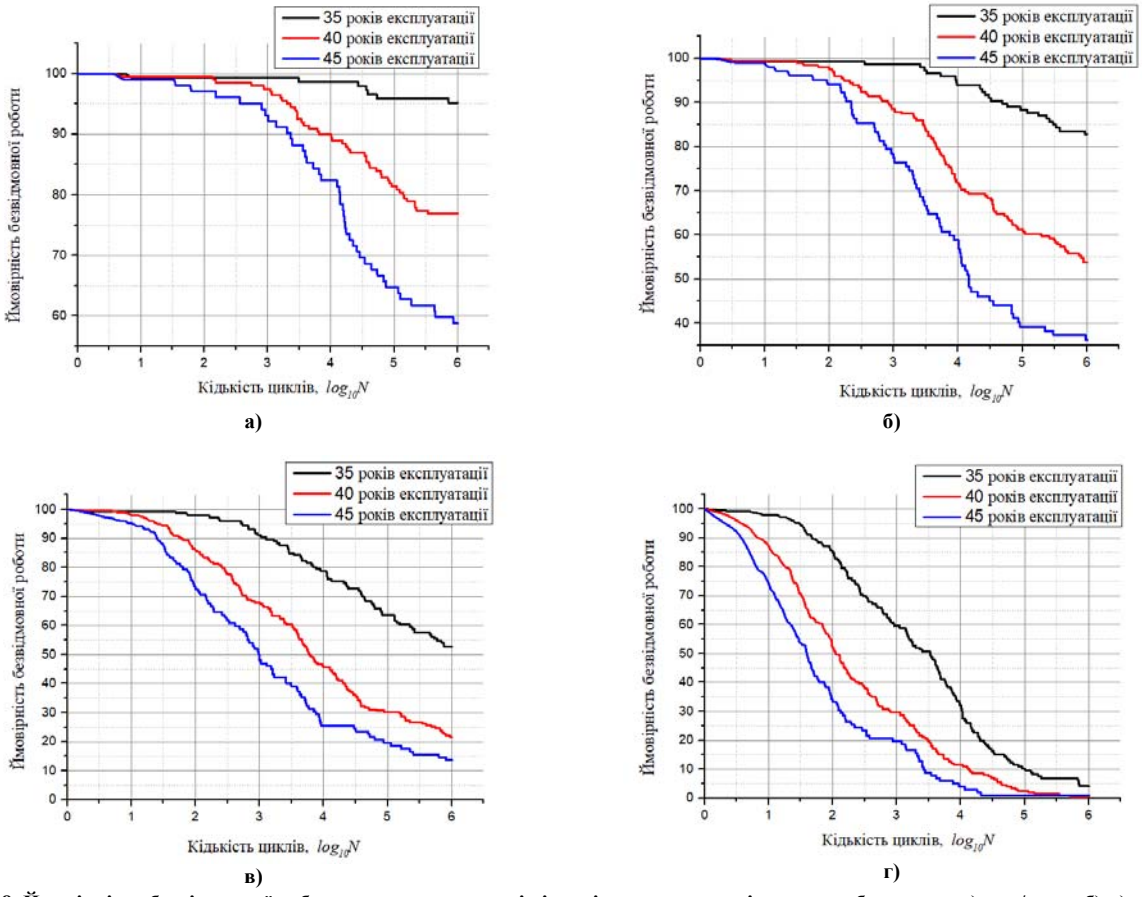
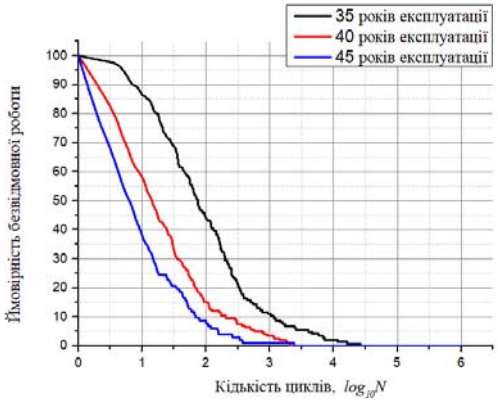


Рис. 8. Ймовірність безвідмовної роботи при навантаженні відповідно до зон розміщення трубопроводу а) вкл/викл, б)-д) зони LC4-LC1 відповідно

Отримано чисельні ймовірності безвідмовної роботи коліна трубопроводу в залежності від величини пульсації тиску при режимах пуску та зупинки експлуатації. Розглянуто такі рівні навантаження: типове, що дорівнює 6 МПа (рис. 2 а) та максимально можливе залежно від місця розташування конструкції LC4-7.1 МПа, LC3-8.6 МПа, LC2-10.6 МПа, LC1-12,8 МПа (рис. 2 б-д).

З отриманих результатів видно, що при навантаженні 6 МПа (рис. 8а), ймовірність безвідмовної роботи після 500 циклів дорівнює 96 %. При максимально можливих рівнях навантаження відповідно від зони розміщення трубопроводу ймовірність безвідмовної роботи менше 100%, починаючи з 100 циклів роботи. З даних результатів можна зробити висновок, що експлуатація трубопроводу з дефектом з відповідними розмірами може бути небезпечною, т.я. ймовірність відмови досить велика.



д)

Рис. 8. Ймовірність безвідмовної роботи при навантаженні відповідно до зон розміщення трубопроводу а) вкл/викл, б)-д) зони LC4-LC1 відповідно (продовження)

Вдячність: Дана робота виконана за підтримки МОН України в рамках реалізації науково-дослідної роботи "Розробка методів математичного моделювання поведінки нових та композиційних матеріалів для оцінки ресурсу та прогнозування надійності елементів конструкцій" (№ ДР 0117U004969).

Висновки

В роботі проведено серію розрахунків криволінійної частини трубопроводу з пошкодженням, що стохастично розвивається при різних термінах експлуатації. На основі отриманих результатів було визначено статистичні характеристики НДС залежно від внутрішнього тиску та часу, який перебуває в експлуатації трубопровід. На основі отриманих даних та розробленої математичної моделі для оцінки накопичення втомних пошкоджень визначено параметр пошкоджуваності для трубопроводу з дефектом. З використання отриманих значень ймовірність безвідмовної роботи коліна трубопроводу залежно від величини пульсації тиску при режимах пуску та зупинки експлуатації. Визначено, що при експлуатації коліна трубопроводу з пошкодженням, яке розвинулось за час експлуатації від 35 до 45 років при максимально можливому навантаженні у всіх відповідних зонах існує ймовірність відмови.

Література

1. Cunha D.J.S. et al. Fatigue analysis of corroded pipelines subjected to pressure and temperature loadings // Int. J. Press. Vessel. Pip. Elsevier Ltd. – 2014. – Vol. 113. – P. 15–24.

2. Mansor N.I.I. et al. A review of the fatigue failure mechanism of metallic materials under a corroded environment // Eng. Fail. Anal. Elsevier Ltd. – 2014. – Vol. 42. – P. 353–365.

3. Jaoude A.A. et al. Lifetime analytic prognostic for petrochemical pipes subject to fatigue // IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline). IFAC. – 2012. – Vol. 8, № PART 1. – P. 707-713.

4. Poberezhnyi L. et al. Fatigue and failure of steel of offshore gas pipeline after the laying operation // Arch. Civ. Mech. Eng. Politechnika Wrocławska. – 2016. – Vol. 16, № 3. – P. 524–536.

5. Fatoba O., Akid R. Low cycle fatigue behaviour of API 5L X65 pipeline steel at room temperature // Procedia Eng. Elsevier B.V. – 2014. – Vol. 74. – P. 279–286.

6. Papadopoulos G.A., Davidov Y.A., Vodenicharov S.B. Low-cycle fatigue loading of BDS 25G pipeline steel // Theor. Appl. Fract. Mech. – 1998. – Vol. 30, № 2. – P. 133–137.

7. Pinheiro B. de C., Pasqualino I.P. Fatigue analysis of damaged steel pipelines under cyclic internal pressure // Int. J. Fatigue. Elsevier Ltd. – 2009. – Vol. 31, № 5. – P. 962–973.

8. Takahashi K. et al. Experimental study of low-cycle fatigue of pipe elbows with local wall thinning and life estimation using finite element analysis // Int. J. Press. Vessel. Pip. Elsevier Ltd. – 2010. – Vol. 87, № 5. – P. 211–219.

9. Takahashi K. et al. Low cycle fatigue behaviors of elbow pipe with local wall thinning // Nucl. Eng. Des. – 2009. – Vol. 239, № 12. – P. 2719–2727.

10. Lemaitre J. A course on damage mechanics / J. Lemaitre. – Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 1996.

Рецензія/Peer review : 7.12.2018 р. Надрукована/Printed :15.2.2019 р.
Рецензент: д.т.н., проф.. Бреславський Д.В.

ТЕХНОЛОГІЇ ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

DOI 10.31891/2307-5732-2019-269-1-53-62
УДК 687.016.5:572.087

А.Л. СЛАВІНСЬКА, О.П. СИРОТЕНКО, Ю. В. КОШЕВКО
Хмельницький національний університет

ТЕХНОЛОГІЧНИЙ АСПЕКТ БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ВИРОБУ-ТРАНСФОРМЕРА

Розроблено механізм забезпечення багатофункціональності сезонної експлуатації виробу шляхом створення асортиментного типологічного ряду виробів, що формуються з оброблених модулів базового виробу-трансформера. Запропоновано методику оптимізації технології оброблення крайових ліній та з'єднань технологічних модулів виробу-трансформера.

Ключові слова: пальто-трансформер, конструктивний пояс, модуль, асортиментний ряд, капсула, трансформований елемент, конструктивно-технологічне рішення, класифікатор, крайові лінії, вузол.

A. L. SLAVINSKA, O. P. SYROTENKO, U. V. KOSHEVKO
Khmelnytsky National University

TECHNOLOGICAL ASPECT OF MULTIFUNCTIONAL UTILIZATION OF THE TRANSFORMABLE CLOTHING

This paper is devoted to the issue of multifunctionality of the transformable coat that is formed of preprocessed modules on principles of universality. Theoretical prerequisite of the concept, which is based on the merging of end use of a garment with its aesthetical advisability, is a condition of reproduction of the body surface in the charts of the clothing types transformations. In order to form the capsule of garments, which exist within the transformable coat, several garment types, which might be considered as reversible clothing, were studied. The list of garment types as follows: a coat, a jacket, and a vest. Metric transformation of the coat was performed with help of the symmetry of similarity that was presented if form of the combinatorial matrix of the composite items of the transformable coat. The algorithm of subordination of the technological features of transformative elements to utility function of utilization was proposed. The algorithm is performed by means of classificatory of design and technological solutions of the basic parts of a garment. Structural and morphological analysis of the technological uniformity of composite parts of the garment ensures the indexes of universality of the classificatory features of technological modules based on the reliability indexes.

Key words: transformable coat, design level, module, assortment range, capsule, transformable element, design and technological solution, classificatory, edge lines, part.

Постановка задачі

Сьогодні в умовах насичення ринку різними видами одягу кардинально змінюються завдання конкурентоспроможності продукції. Перед швейними підприємствами виникає необхідність у створенні та впровадженні у виробництво одягу універсального призначення. До них відноситься одяг типу «трансформер». Він володіє низкою переваг: економічністю, простотою, оригінальністю вирішення, багатофункціональністю композиційних варіантів поєднань його складових. Він істотно зменшує кількість речей у гардеробі та розширює багатофункціональність асортиментного ряду виробів, що можуть бути сформовані на його основі з деталей вихідного базового виробу.

Ігрові елементи імпровізації передбачаються багатьма дизайнерами саме в процесах експлуатації виробу. Такі можливості можуть бути закладені у змінюванні форми, пристібних елементах, в незвичних доповненнях і аксесуарах. Саме змінювання форми впливає на конструкцію і технологію виробу-трансформера. Технологія виготовлення виробів-трансформерів існує у вигляді «ноу-хау» у дизайнерських розробках або у вигляді рекомендацій описового характеру для виготовлення окремих виробів. Крім того, відсутність типової технології виготовлення виробів-трансформерів унеможливлює використання типового технологічного процесу, оскільки відсутні технологічні прийоми ідентифікації елементів трансформації.

Актуальність розробки виробу-трансформера полягає в тому, що з його допомогою кожна людина отримує універсальну річ, яка дозволяє заощадити час і кошти, продовжити термін експлуатації виробу.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

В XXI столітті сформувались нові підходи до створення багатофункціонального одягу, який забезпечує універсальність утилітарної функції виробу. Концепція визначення трансформованого об'єкта як матеріальної структури здатної приймати різні конструктивні і естетичні стани на основі «переконструювання» [1] містить алгоритми забезпечення практичного призначення шляхом конструктивної досконалості та логічного поєднання з естетичною доцільністю.

Ефективність конструктивної досконалості швейного виробу визначає інформаційна модель технічної структури одягу [2], яка визначає варіант конструктивної категорії у основній конструктивній групі за умови відтворення поверхні тіла в схемах членування деталей [3]. Використання універсальної основи конструкції плечового одягу для побудови асортиментної групи верхнього одягу [4] підтверджує ефективність параметричного задання членувань в графічних операціях побудови деталей виробу-трансформера [5]. Використання такої універсальної конструкції є обґрунтованим та ефективним лише за умови наявності структурної систематизації конструктивних поясів, задіяних у формуванні номінальних

ознак асортиментного виду виробу.

Окремі дослідження у сфері трансформації одягу присвячені безпосередньо прийомам трансформації в одязі [6]. Однак алгоритм забезпечення експлуатаційних властивостей виробу-трансформера шляхом показників стійкості елементів з'єднання до зовнішніх дій процедурно не прописаний.

Вибір параметрів і режимів з'єднань в технологічних процесах виготовлення залежить від інтелекту та професійних навиків проектанта.

Отже, існують об'єктивні причини, пов'язані з адаптацією конструкторсько-технологічної підготовки окремих виробів до принципів капсульного проектування універсального виробу-трансформера. Вирішення завдань забезпечення надійності і достовірності властивостей кінцевого продукту дозволить забезпечити кінцеву якість виробу-трансформеру.

Мета і завдання дослідження

Мета – забезпечення багатофункціональності міжсезонного застосування верхнього одягу шляхом створення асортиментної капсули жіночого пальта-трансформера, що складається із модулів асортиментних вподобань з позицій динамічного способу життя та сезонних застосувань виробу.

Завдання: аналітично обґрунтувати морфологічний аспект видозмінювання функції одягу; дослідити комбінаторне формоутворення предметів виробу-трансформера; визначити класифікаційні ознаки конструктивно-технологічних рішень трансформованих елементів за показниками надійності в експлуатації.

Виклад основного матеріалу

Найпоширенішим визначенням терміну трансформація (лат. trans – через, formation – утворення виду) є перетворення, змінювання виду, форми, суттєвих властивостей будь-чого [7]. Отже, виріб-трансформер – це багатофункціональний виріб, який володіє рухомою структурою, що дозволяє йому перетворюватись в інші вироби, або суттєво змінювати свої властивості [8]. Для таких перетворень застосовують наступні методи: комбінаторний, плоского крою, модульний, кінетизму.

В цілому, виріб-трансформер (ВТ) складається з множини стабільних (СЕ) елементів виробу і множини трансформерних елементів (ТЕ), в які входять сукупність конструктивних елементів (КЕ), та безпосередньо сукупність засобів трансформації (ЗТ).

$$ВТ \in СЕ \cup ТЕ, \qquad ТЕ \in КЕ \cup ЗТ \qquad (1)$$

Оскільки об'єктом дослідження є верхній одяг, який експлуатується протягом осені, зими та весни, то на прикладі демісезонного пальта можна розглянути розширення сезонного періоду експлуатації шляхом перетворення його модулів в куртку, напівпальто і жилет за умови збереження стабільності конструктивних елементів стану, в якому збережена однакова для всіх названих виробів величина конструктивних вимірів деталей.

Для досліджень пальта-трансформера обрано спільну для всіх перетворень конструкцію пальта з вшивним класичним рукавом, в якій розглянуте поєднання прямокутної і трапецієвидної форм для утворення похідних форм за величиною форми (велика, середня, мала) шляхом змінювання довжини та основних ліній горизонтального членування форми. Структурна систематизація основних конструктивних поясів в конструкціях системи «пальто – жилет – куртка (напівпальто)» наведена в матриці морфологічного аналізу (рис. 1) на трьох рівнях: базова форма ГО1, базова форма ГО2, основний силует Си2.

Отже, гіпотетичний образ пальта-трансформера Си2 формують базові елементи наступних конструктивних поясів: лінія талії ГО1 жилета, лінія стегон ГО2 куртки, лінія низу ГО3 пальта.

Основними елементами утворення об'ємної форми одягу є шви, виточки, волого-теплова обробка, сітьові кути, які можуть існувати як окремо, так і комбінаторно. Формоутворення у пальті-трансформері досягається за рахунок поздовжніх та поперечних конструктивних членувань. Поздовжні членування застосовуються в конструктивних лініях відрізного бочка та середнього шва на спинці. Поперечні членування, які розміщені нижче лінії талії та лінії стегон, служать прийомами трансформації, за допомогою яких відбувається зміна форми виробу-трансформеру у вигляді модулів капсули трансформованих виробів.

Типова конструкція жіночого пальта з вшивним рукавом може бути 3-, 5-, 6-шовною, відрізною і невідрізною по лінії талії. Переважно п'ятишовна (2 бічні шви, середній шов спинки та шов пришивання бочка) є такою, що відповідає схемі переміщень конструктивних зон пальта-трансформера. Тобто лінії членувань у виробі-трансформері доцільно розглядати в поєднанні конструктивних і технологічних характеристик швів в операціях з'єднання – від'єднання модулів за ознакою однотипності їх різновидів в системі «трансформер» 1 – (пальто) – трансформер; 2 – (куртка) – трансформер; 3 – (жилет) – трансформер.

Різноманітність форм деталей плечового одягу, за показниками ергономіки та антропометрії частини одягу повинні відповідати основним ділянкам тіла. Виділяють п'ять ділянок тіла та частин одягу, які обмежуються конструктивними поясами в лініях переходу ділянок тіла [7]. Лінії переходу визначають крій рукава та його членування та членування стану – поперечне, повздовжнє. Для пальта-трансформера, яке перетворюється в жилет або куртку, раціональним кроєм рукава є вшивний одношовний, з манжетою. Членування стану: поздовжнє – п'ять швів; поперечне – талія, стегна (рис. 2).

Розроблена схема раціональних членувань поверхні тіла та пальта-трансформера враховує логічне поєднання основних конструктивних частин одягу з основними конструктивними категоріями за числом конструктивних отворів, відповідно до таблиці 1.

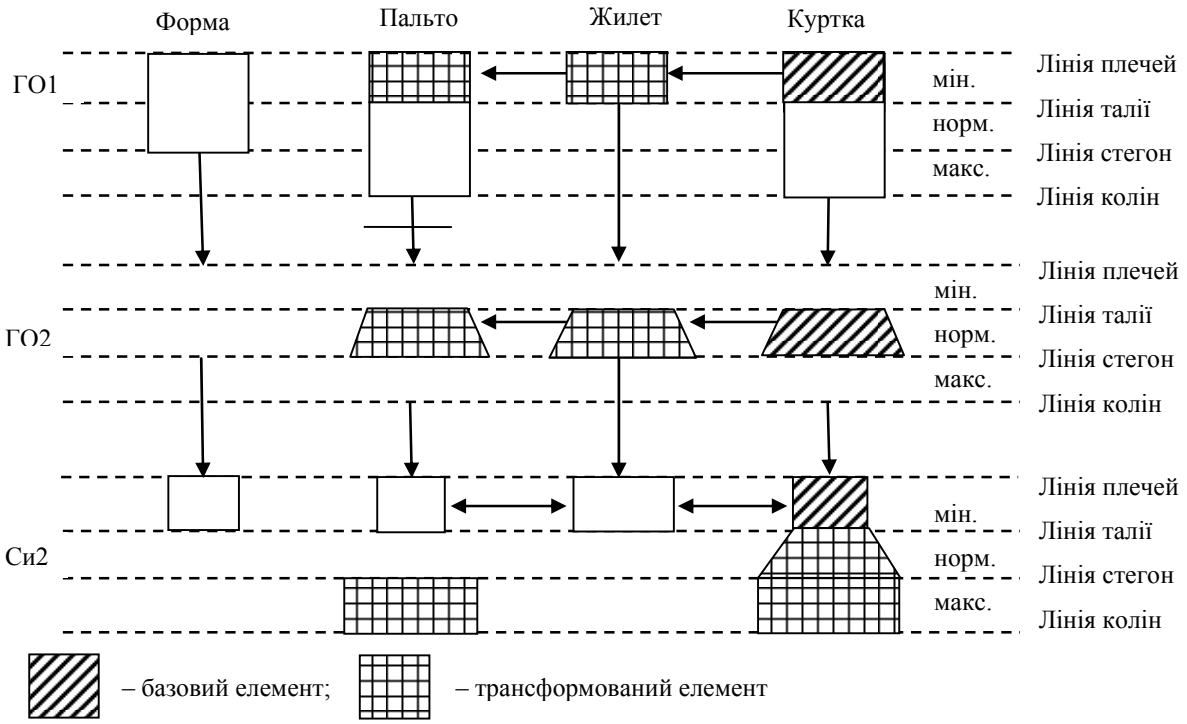


Рис. 1. Матриця структурного аналізу гіпотетичного образу форми пальта-трансформера

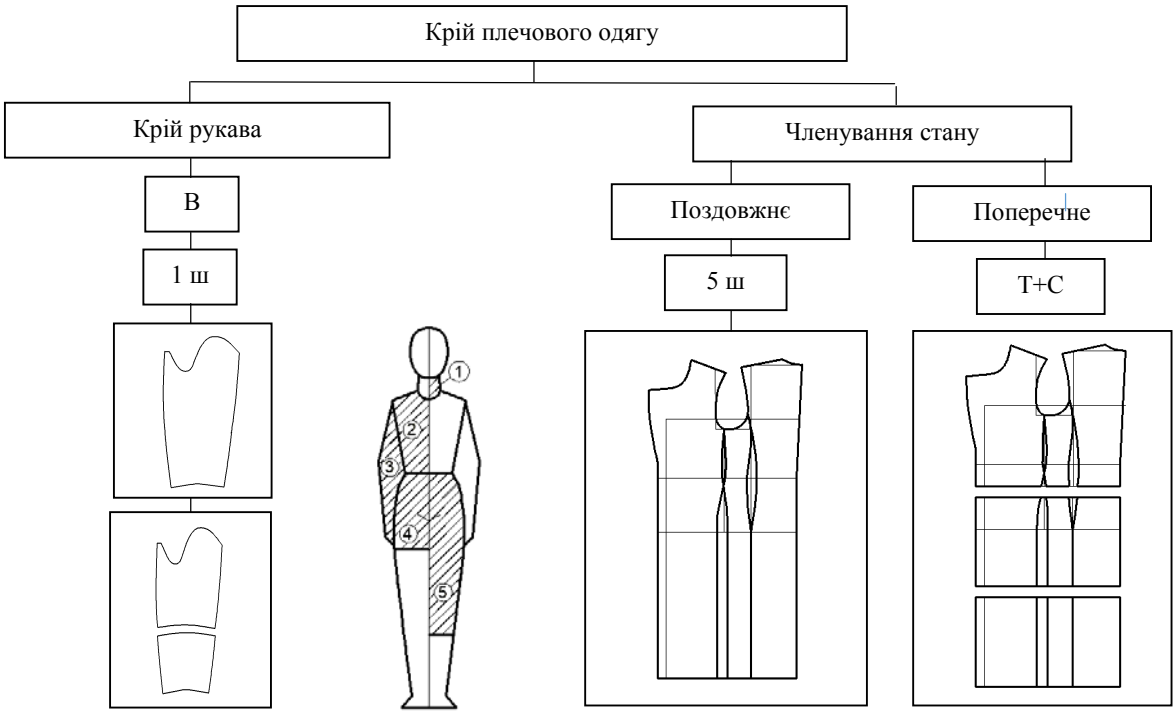


Рис. 2. Схема членування поверхні тіла та деталей пальта-трансформера

Таблиця 1

Відповідність пальта-трансформера частинам тіла людини

Номер ділянки тіла та частин одягу	Основні ділянки тіла	Приклад виду або частини одягу
1	Шия	Комір
2	Грудна клітка	Жилет, куртка
3	Верхні кінцівки	Рукав
4	Тазовий пояс	Тазова частина пальта, куртки Тазова частина жилета
5	Нижні кінцівки	Нижня частина жилета Нижня частина пальта, куртки

Форми трансформації пальта прийомами відділення-приєднання доцільно виконати шляхом основних конструктивних зон членування фігури та видовою ознакою виробу.

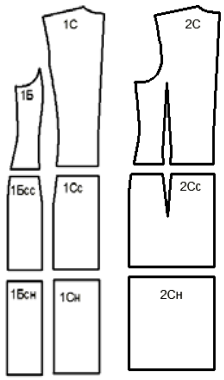
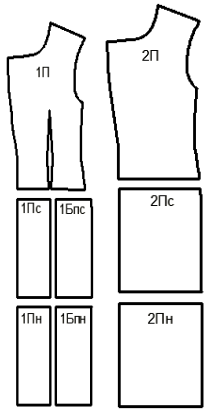
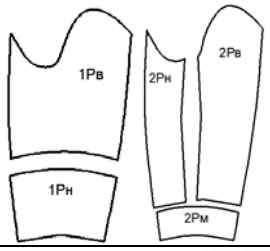
Композиційна трансформація пальта повинна визначатися взаємозв'язком позицій конструктивних поясів з композиційним розташуванням членувань для утворення нових виробів.

Групування деталей за технологічною подібністю здійснюється за їхніми конструктивними ознаками, які впливають на технологію їх виготовлення. Тому, саме конструктивні ознаки покладені в основу формування коду та групування виробів за цим кодом. Для окремих конструктивно-композиційних рішень (ОККР) виробів найбільш прийнятим є паралельний метод кодування. У процесі кодування ознакам присвоюють числові позначення [2]. Код позначення і його структура характеризуються кількість ознак.

Формування ознак окремих конструктивно-композиційних рішень (ОККР) виконують, користуючись принципами конструктивної, технологічної, функціональної і композиційної сумісності деталей та вузлів виробу (табл. 2).

Таблиця 2

Різновидності членувань типових деталей пальта-трансформера

№ з/п	Найменування деталей	Шифр	Замальовка варіантів деталей
1	Спинка	1.1 1.6	
2	Пілочка	2.2 2.3	
3	Рукав	3.3 3.4 8.3	
4	Комір	4.2 4.4	

Для утворення капсули виробів у межах пальта-трансформера розглянуті пальто, жилет, куртка, які можуть бути двобічними. Для цього застосовані такі системи трансформації:

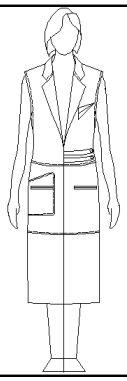
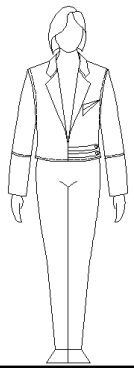
- класична переносна система вздовж вертикальної осі симетрії, що дозволяє зберегти незмінними метричні параметри форми;
- системи симетрії подібності за принципами «складання», «додавання-віднімання» у побудові комплектів.

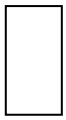
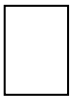
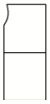
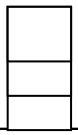
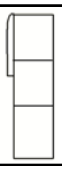
При цьому елементи, що перебувають у відносинах геометричної подібності, можуть переноситись як у здовж осі симетрії, так і дзеркально відображатись в горизонтальних площинах. Метричні параметри форми можуть збільшуватись або зменшуватись [9]. В табл. 3 наведена матриця комбінаторного

перетворення графічних символів ескізів базових форм пальта, жилета і куртки.

Таблиця 3

Матриця комбінаторного формоутворення предметів виробу-трансформера на рівні ескізу на основі базових форм

Геометричні форми складових предметів виробу-трансформера		
		
Пальто	Жилет	Куртка

	Морфологічний аналіз та синтез форм виробів трансформера		
	Конструктивне вирішення плечового поясу та рукава		
Метрична трансформація пальта 			
			
			

Верхній одяг належить до багатошарових виробів, які мають значну різноманітність конструктивно-технологічних рішень трансформерних елементів крайових ліній (горловина, пройма, борт, низ) та композиційних ліній внутрішніх членувань (кокетка, рельєф, підріз, кишеня тощо).

Відповідно до ознак ідентифікації елементів трансформації (ТЕ) проаналізовані варіанти функціональних вузлів оформлення горловини: без коміра, комір стояк, стояче-відкладний, капюшон; оформлення застібки – тасьма-блискавка «клевант», на зав’язки, петлі, ґудзики, кнопки; оформлення кишень – прорізні з листочкою, з клапаном та обшивкою, накладні в рамку; накладні, накладні з клапаном.

Підпорядкованість технологічних ознак ТЕ виробу-трансформера визначають ознаки ідентифікації в процесі трансформації 3 – 4-го рівня синергетичних зв’язків в системі «асортимент – технологія – цільова функція» відповідно до рекомендацій [10]. В асортименті це однорідність по числу формоутворюючих деталей; спільність параметрів формоутворення; спільність конструктивних членувань. В технології це однотипність формоутворення основних деталей; подібність конструктивних елементів; однотипність одиничних технологічних процесів. У цільовій функції – це ідентичність технологічних процесів на етапах

заготовки і монтажу; однотипність властивостей предметів праці; повторюваність видів швів у складальних одиницях.

Технологічна однорідність системи капсули виробів-трансформерів передбачає групування технологічних операцій перш за все за способом з'єднання, видом строчки і шва.

Відповідно до ДСТУ ISO 4916:2005 необхідно ідентифікувати серію стібків або типів стібків по багатошаровому матеріалу ТЕ. Для цього розглянута класифікація зшивних швів, яка містить 8 класів. Стабільні елементи СЕ визначених функціональних вузлів для трансформації відповідають швам першого і другого класу. Трансформовані елементи ТЕ відповідають 3, 4, 7 і 8-му класам (табл. 4).

Таблиця 4

Класифікація зшивних швів для трансформованих елементів [11]

Деталі	Клас			
	3	4	7	8
	1 або більше	1+1 або більше	1 або більше	-
	-	В тому самому горизонтальному напрямку	1 або більше	-
	-	-	-	-
	1 або більше	0 або більше	1 або більше	1 або більше
Мінімум загальної кількості деталей	2 або більше	2 або більше	2 або більше	1 або більше
Конфігурація основного матеріалу				

Систематизація швів, доцільних для ТЕ пальта-трансформера, наведена в табл. 5.

Таблиця 5

Характеристика швів для пальта-трансформера

Назва шва	Графічне зображення	Умовне позначення	Код з'єднання	Область використання
Зшивний			1.01.01	Для з'єднання плечових, бокових зрізів та ліктьових зрізів рукава
Зшивний з тасьмою блискавкою			1.11.0.1	Для з'єднання тасьми блискавки між двома шарами матеріалу
Обшивний			1.06.02	Для обшивання бортів, низу виробу, коміра та поясів
Обшивний в «кант»			1.09.01	Для обшивання зрізів деталей підкладкою
Настрочний			2.02.07	Для імітації накладної кишені
Пришивний			5.17.01	Для пришивання обшивки в обробці прорізної кишені
Оздоблювальний			5.01.01	Використання оздоблювальних строчок

Багатофункціональність пальта-трансформера повинна характеризуватись трьома властивостями: перетворенням в інший вид, сезонною комфортністю, практичністю використання. Практичність використання визначає фурнітура, яка виготовляється наступних типів: пряжки, рамки, кільця, регулятори довжини застібки, ґудзики, петлі, гачки, кнопки. Якість фурнітури оцінюється за зовнішнім виглядом, розмірами, зусиллям фіксації і показнику міцності. Пряжки, рамки і кільця виготовляються як металічними, так і пластмасовими і контролюються за стійкістю покриття. Систематизація фурнітури, яка забезпечує

застібання функціональних вузлів пальта-трансформера наведена на рис. 3.

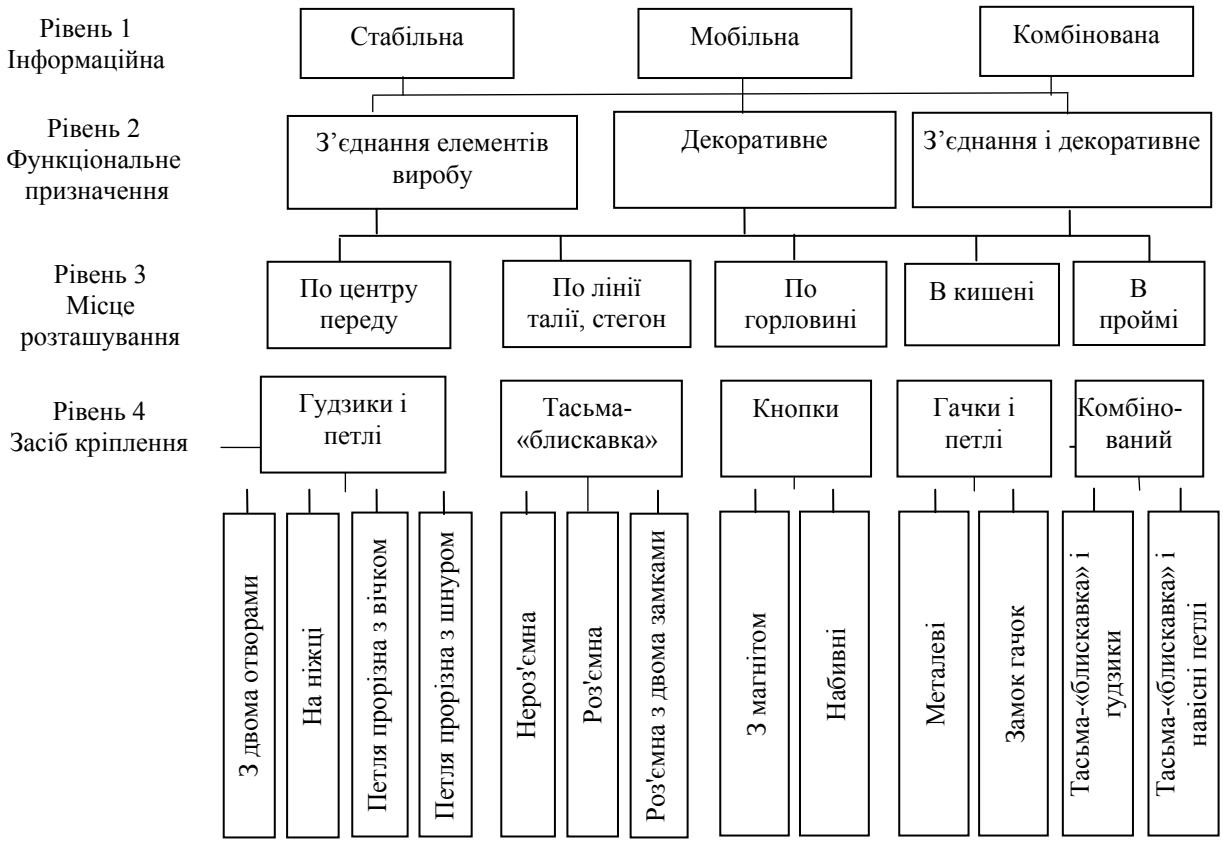


Рис. 3. Класифікація застібок пальта-трансформера

Оптимізація технології оброблення крайових ліній виробу-трансформера досягнута формуванням класифікатора конструктивно-технологічних рішень виробів капсули пальта-трансформера шляхом виявлення однорідних технологічних операцій для підвищення універсальності швейних машин, що сприятиме використанню в технологічному процесі пооопераційної технології [12].

Для розробки класифікатора конструктивно-технологічних рішень (КТР) складальних одиниць перш за все необхідно систематизувати інформацію з характеристики зовнішнього вигляду різновидів основних деталей пальта-трансформера, яка представлена в таблиці 6.

Таблиця 6

Класифікація КТР асортиментного ряду виробів пальта-трансформера

Код	Класифікаційна ознака	Код	Класифікаційна ознака
	1. Різновидність виробів		***3. Силует***
1	Пальто	1	Напівприлягаючий
2	Куртка	2-9	Резерв
3	Жилет		***4. Конструкція борту, вид застібки***
4-9	Резерв	1	Низ борту прямолінійний, застібка центральна на кнопки
	2. Вид матеріалу		
1	Вовна	2	Низ борту фігурний, застібка зміщена на кнопки
2-9	Резерв		
		3-9	Резерв
	5. Конструкція спинки	1	***7. Конструкція рукава***
1	З середнім швом, з відрізним бочком	2	Одношовний відрізний з манжетою
2	З середнім швом, рельєфами	3	Двошовний
3	З середнім швом, виточками	4-9	Резерв
4	Відрізна по конструктивних поясах		***8. Конструкція коміра, лацкани***
5-9	Резерв	1	Піджачний з середніми лацканами
	6. Конструкція пілочки	2	Без коміра
1	Суцільна	3	Стояче-відкладний
2	З виточками	4-9	Резерв
3	Відрізна по конструктивних поясах		
4-9	Резерв		

Для розробки класифікатора КТР складальних одиниць (спинки, пілочки) пальта-трансформера, використані умови – кожний наступний рівень конкретизує попередній. При цьому ці рішення характеризують спочатку конструктивні, а потім технологічні рішення (рис. 4-5). Структура коду наведена на рис. 6-7.

1. Спинка			Рівні
1.1. Спинка з середнім швом			Конструкція спинки
1.1.1. З відрізним бочком Відрізна нижче лінії талії Відрізна нижче лінії стегон	1.1.2. З рельєфами Відрізна нижче лінії талії Відрізна нижче лінії стегон	1.1.3. З виточками Відрізна нижче лінії талії Відрізна нижче лінії стегон	Деталі частин спинки
1.1.1.1. Часткове дублювання спинки та відрізного бочка	1.1.2.2. Часткове дублювання середньої та бічної чистин спинки	1.1.3.3. Часткове дублювання спинки	Надання формостійкості
1.1.1.1.1. З'єднання пілочки з бочком З'єднання частин спинки	1.1.2.2.2. Обробка рельєфів З'єднання частин спинки	1.1.3.3.1. Обробка виточок З'єднання частин спинки	Формоутворення

Рис. 4. Кодування КТР спинки

2. Пілочка			Рівні
2.1. Пілочка суцільна			Конструкція пілочки
2.1.1. Відрізна нижче лінії талії Відрізна нижче лінії стегон	2.1.2. З виточками Відрізна нижче лінії талії Відрізна нижче лінії стегон	2.1.3. З виточками Відрізна нижче лінії талії Відрізна нижче лінії стегон	Деталі частин пілочки
2.1.1.1. Дублювання пілочки	2.1.2.1. Дублювання пілочки	2.1.3.1. Дублювання пілочки	Надання формостійкості
2.1.1.1.1. З'єднання частин пілочки	2.1.2.1.2. Обробка виточок З'єднання частин пілочки	2.1.3.1.2. Обробка виточок З'єднання частин пілочки	Формоутворення
2.1.1.1.1.1. Обробка борту в розкол на магнітні кнопки	2.1.2.1.2.2. Обробка борту в розкол на магнітні кнопки	2.1.3.1.2.2. Обробка борту в розкол на магнітні кнопки	Спосіб обробки краю борта
2.1.1.1.1.1.1.2. Обробка нагрудної кишені в рамку Обробка бічної кишені в рамку	2.1.2.1.2.2.1.3. Обробка нагрудної кишені в рамку Обробка бічної накладної кишені з клапаном	2.1.3.1.2.2.3. Обробка бічної накладної кишені з клапаном	Спосіб обробки кишень

Рис. 5. Кодування КТР пілочки

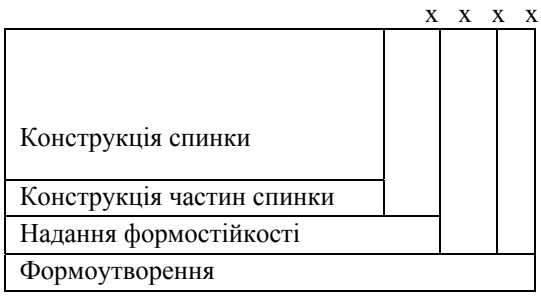


Рис. 6. Структура коду класифікатора КТР спинки

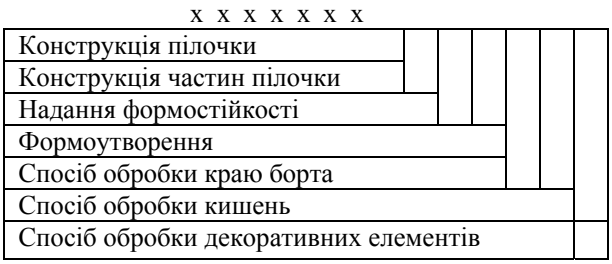
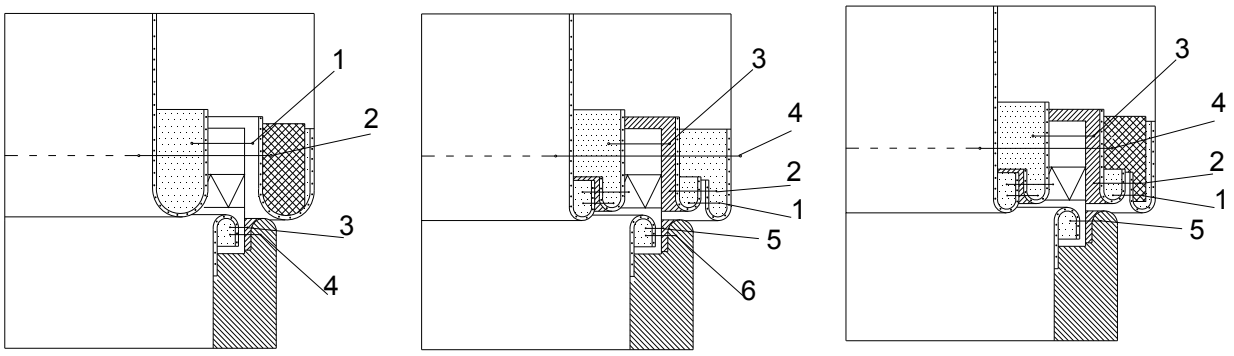


Рис. 7. Структура коду класифікатора КТР пілочки

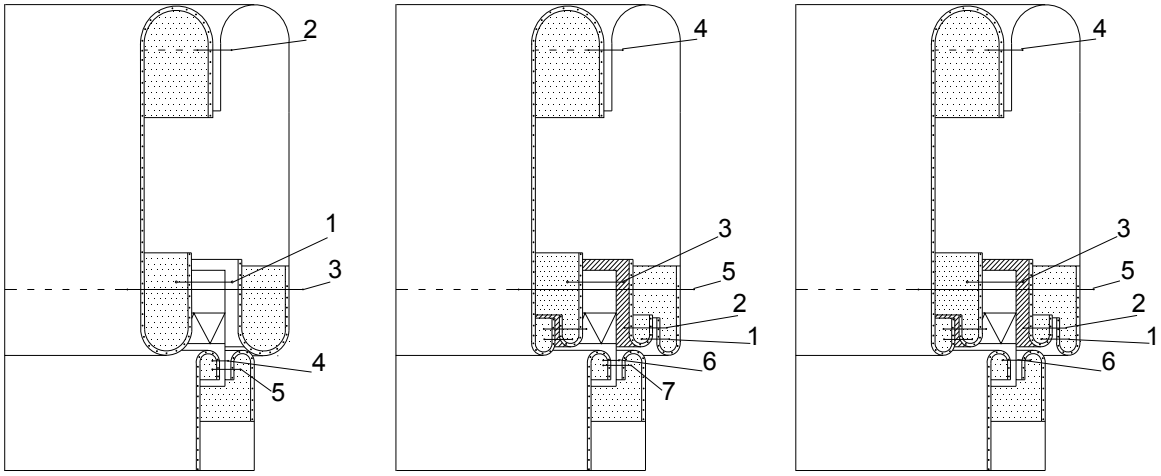
За результатами аналізу класифікаторів КТР спинки та пілочки, які є одними з найважливіших складальних одиниць, виділені технологічно однорідні групи: спинка – 2 групи; пілочка – 5 груп.

Для оптимізації трасформерних з'єднань обрано три варіанти КТР, які враховують особливості експлуатації пальта-трансформера. Приклади вузлів зі складною конфігурацією з'єднань представлені на рис. 8–10 у вигляді складальних схем перерізів із нумерацією технологічний операцій.



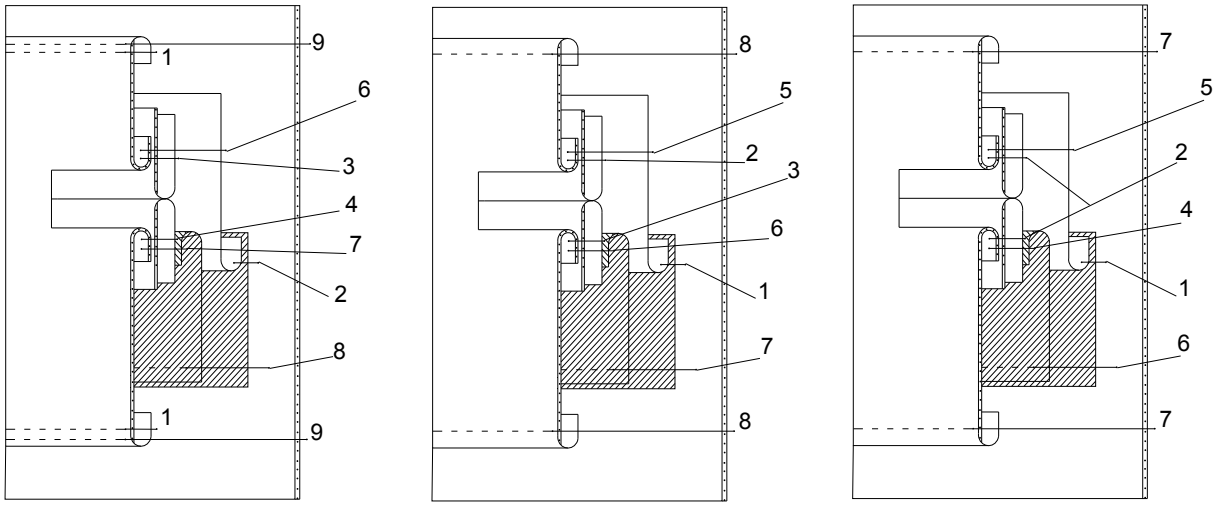
КТР1 КТР2 КТР3

Рис. 8. Схеми перерізів вузлів обробки з'єднань рукава з проймою



КТР1 КТР2 КТР3

Рис. 9. Схеми перерізів обробки коміра та з'єднання його з горловиною



КТР1 КТР2 КТР3

Рис. 10. Схеми перерізів обробки накладної кишені «в рамку»

Проаналізувавши схеми з'єднання рукава з проймою, виділено як оптимальні два методи обробки – КТР2 та КТР3. Оскільки у двобічному виробі обидва шари виробу з пальтової тканини, то краї пройми оброблені обшивками, для уникнення потовщення при з'єднанні рукава з проймою за допомогою тасьми-«блискавки».

На основі аналізу схем з'єднання коміра з горловиною для кращого його прилягання та обробки, виділено два варіанти: КТР2, КТР3. Так як при обробці за прикладом КТР1 спостерігається значне потовщення на ділянці шиї.

При визначенні ефективності експлуатації виробу трансформера доцільно враховувати динамічний ефект змінювання розмірів крайових ліній модулів. Комфортність трансформованих з'єднань суттєво залежить від потовщення матеріалів, що обумовлено як видом швів, так і кривизною контурів.

Висновки

1. Аналітично обґрунтована модель структурно-морфологічного аналізу гіпотетичного образу

капсули пальта-трансформера на основі застосування систем трансформації модулів окремих виробів прийомами відділення-приєднання з інтерпретацією ергономічності рівнів членувань.

2. Розроблені алгоритми геометричних відносин комбінаторного формоутворення пальта, жилета, куртки та рівні метричної трансформації пальта із застосуванням параметричної типізації з'єднань його функціональних вузлів.

3. На основі класифікації зшивних швів для трансформованих елементів розроблені рекомендації з технологічного забезпечення надійності конструктивно-технологічних рішень складальних одиниць модулів капсули виробу-трансформера відповідно до сформованих класифікаторів КТР.

Література

1. Петушкова Г.И. Трансформация как метод проектирования костюма / Г.И. Петушкова. – М. : ИИЦ МГУДТ, 2008. – 241 с.

2. Славінська А. Л. Методи типового проектування одягу : навч. посібник / А. Л. Славінська. – Хмельницький : ХНУ, 2012. – 179 с.

3. Славінська А. Л. Практикум з проектування і конструктивного моделювання одягу : в 2 ч. Ч. 1: Проектування та технічне моделювання базових конструкцій одягу : навч. посібник / А. Л. Славінська, О. П. Сиротенко. – Хмельницький : ХНУ, 2016. – 267 с.

4. Единая методика конструирования одежды СЭВ (ЭМКО СЭВ). Базовые конструкции женской одежды. – М. : ЦНИИТЭИлегпром, 1988. – Т. 2. – 119 с.

5. Славінська А. Л. Дизайн-програма ідентифікації конструктивно-технологічних модулів виробів у структурі технологічного процесу / А. Л. Славінська // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2015. – № 5. – С. 134–140.

6. Современный процесс трансформирующихся изделий [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://www.rusnauka.com/45_VSN_2015/Tecnic/12_203794.doc.htm.

7. Акилова З.Т. Моделирование одежды на основе принципа трансформации (новые приемы разработки модных форм одежды) / З.Т. Акилова. – М. : Легпромбытиздат, 1993. – 200 с.

8. Захаркевич О.В. Визначення показників властивостей матеріалів для виробів-трансформерів верхнього одягу / О. В. Захаркевич, Н. Г. Савчук // Вісник Хмельницького національного університету. – 2013. – № 3. – С. 79–82.

9. Захаркевич О.В. Обґрунтування вибору факторів впливу на сегментацію виробів-трансформерів / О. В. Захаркевич // Легка промисловість. – 2013. – № 1. – С. 50–52.

10. Славінська А. Л. Логістична координація інформаційних потоків серії моделей швейних виробів / А. Л. Славінська // Вісник Хмельницького національного університету. – 2015. – № 6. – С. 100–107.

11. ДСТУ ISO 4916:2005. Матеріали текстильні. Типи швів. Класифікація та термінологія (ДСТУ ISO 4916:1991, IDT). – К. : Держспоживстандарт України, 2006. – 66 с.

12. Захаркевич О.В. Розрахунок оптимальних технологічних параметрів обробки крайових зрізів у двосторонніх виробах / О. В. Захаркевич, Н. Г. Савчук // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – 2007. – № 1 (107). – С. 177–181.

References

1. Petushkova G.I. Transformacija kak metod proektirovanija kostjuma / G.I. Petushkova. – M. : IIC MGUDT, 2008. – 241 s.

2. Slavinska A. L. Metody typovoho proektuvannia odiahu : navch. posibnyk / A. L. Slavinska. – Khmelnytskyi : KhNU, 2012. – 179 s.

3. Slavinska A. L. Praktykum z proektuvannia i konstruktyvnoho modeliuvannia odiahu : v 2 ch. Ch. 1: Proektuvannia ta tekhnichne modeliuvannia bazovykh konstruktsii odiahu : navch. posibnyk / A. L. Slavinska, O. P. Syrotenko. – Khmelnytskyi : KhNU, 2016. – 267 s.

4. Edinaja metodika konstruirovanija odezhdy SJeV (JeMKO SJeV). Bazovye konstrukcii zhenskoj odezhdy. – M. : CNIITJeIlegprom, 1988. – T. 2. – 119 s.

5. Slavinska A. L. Dyzain-prohrama identyfikatsii konstruktyvno-tekhnolohichnykh moduliv vyrobiv u strukturi tekhnolohichnoho protsesu / A. L. Slavinska // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2015. – № 5. – S. 134–140.

6. Sovremennyj process transformirujushhihsja izdelij [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu : http://www.rusnauka.com/45_VSN_2015/Tecnic/12_203794.doc.htm.

7. Akylova Z.T. Modelyrovanye odezhdы na osnove pryntsypa transformatsyy (novыe pryemы razrabotky modnыkh form odezhdы) / Z.T. Akylova. – M. : Lehprombыtyzdat, 1993. – 200 s.

8. Zakharkevych O.V. Vyznachennia pokaznykiv vlastyvostei materialiv dlia vyrobiv-transformeriv verkhnoho odiahu / O. V. Zakharkevych, N. H. Savchuk // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2013. – № 3. – S. 79–82.

9. Zakharkevych O.V. Obgruntuvannia vyboru faktoriv vplyvu na sehmentatsiiu vyrobiv-transformeriv / O. V. Zakharkevych // Lehka promyslovist. – 2013. – № 1. – S. 50–52.

10. Slavinska A. L. Lohistychna koordynatsiia informatsiinykh potokiv serii modelei shveinykh vyrobiv / A. L. Slavinska // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. – 2015. – № 6. – S. 100–107.

11. DSTU ISO 4916:2005. Materialy tekstylni. Typy shviv. Klasyfikatsiia ta terminolohiia (DSTU ISO 4916:1991, IDT). – K. : Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 2006. – 66 s.

12. Zakharkevych O.V. Rozrakhunok optymalnykh tekhnolohichnykh parametriv obrobky kraiovykh zriziv u dvostoronnikh vyrobakh / O. V. Zakharkevych, N. H. Savchuk // Visnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu im. V. Dalia. – 2007. – № 1 (107). – S. 177–181.

Рецензія/Peer review : 28.1.2019 р. Надрукована/Printed :15.2.2019 р.
Стаття рецензована редакційною колегією

DOI 10.31891/2307-5732-2019-269-1-63-69
УДК 677.075: [687.016:687.13]

Л.Є. ГАЛАВСЬКА, О.В. ГНАТЮК
Київський національний університет технологій та дизайну

РОЗРОБКА АСОРТИМЕНТУ ТРИКОТАЖНИХ ВИРОБІВ ДЛЯ ДІТЕЙ ДОШКІЛЬНОГО ВІКУ З ВИКОРИСТАННЯМ ЛЛЯНОЇ ЕКО-СИРОВИНИ

Робота присвячена розробці асортименту трикотажних виробів побутового призначення для дітей ясельної та дошкільної групи, вироблених з використанням екологічно безпечної лляної пряжі. Для реалізації поставленої мети здійснено ескізне проектування дитячих трикотажних виробів весняно-літнього асортименту для дівчаток дошкільного віку. Запропоновано структуру переплетень для виготовлення виробів. Досліджено споживні характеристики розроблених зразків трикотажних полотен та виявлено характер впливу структури переплетення на зміну лінійних розмірів після прання та сушіння, деформаційні характеристики, рівень їх повітропроникності та капілярності. У ході дизайн-проектування спроектовано та виготовлено в матеріалі комплект трикотажних виробів для дівчаток дошкільного віку, що може бути використаний в умовах трикотажного виробництва у якості промислового зразка.

***Ключові слова**: еко-сировина, дитячий еко-одяг, перехресне переплетення, гладь, льон.*

L.IE. HALAVSKA, O.V. GNATIUK
Kyiv National University of Technology and Design

DEVELOPMENT OF ASSORTMENT OF KNITWEAR PRODUCTS FOR CHILDREN OF PRESCHOOL AGE WITH USING LINEN ECO-RAW MATERIALS

Children's clothing is the kind of clothing that needs to be given the most attention during its manufacture. Starting from the selection of yarn fiber to the appearance. This is especially true for baby clothes and clothes that are in contact with the delicate skin of the baby. Clothes should not cause inconvenience to the child, cause allergic reactions. However, it must be attractive externally, so that the child is wearing it with joy and without caprice. Also, children's clothing should be environmentally friendly, made of eco-fibers and be tested for the presence of chemicals in accordance with world standards. In recent years, the world has embraced fashion for eco-friendly products, while eco-friendly products are saviours of our planet. In this work a sketch design of children's knitwear of spring-summer assortment for girls of preschool age was carried out; the structure of the binding for the production of products is proposed; the consumer characteristics of the developed samples of knitted cloths are researched. To create a child's product, it is suggested to use knitted fabrics for interlacing the plain knitted fabric and cross-section on the basis of double half-phang with omitted loop columns made of environmentally friendly linen yarn. The study of consumer characteristics of air permeability, capillarity and change in linear dimensions after washing is within the limits of the norm, and determination of deformation shows that there is a large proportion of residual deformation, which is explained by the use of linen yarn. Determination of consumer characteristics has confirmed that the investigated knitted linen from flax is ideally suited for the manufacture of clothing for spring and summer assortment.

***Keywords:** eco-raw materials; children's eco-clothing; cross-weaving; plain knitted fabric; linen.*

Вступ

Дитячий трикотаж – це такий асортимент одягу, якому потрібно приділяти найбільше уваги на усіх етапах його створення. Починаючи від вибору волокна для пряжі та закінчуючи зовнішнім виглядом. Особливо це стосується дитячої білизни та одягу, який контактує з ніжною шкірою дитини. Одяг не повинен завдавати незручностей дитині та викликати подразнення шкіри. При цьому він має бути привабливим зовні, щоб дитина з радістю вдягала його. Також дитячий одяг має бути екологічно безпечним й проходити обов'язкову перевірку на наявність хімічних речовин відповідно до існуючих еко-стандартів. Для його виготовлення слід використовувати екологічно чисту сировину.

На сьогодні питання екологічної безпечності текстильних матеріалів є досить актуальними. Адже від екологічності вирощення сировини, способу виготовлення, способу пофарбування та обробки залежить не лише стан нашого здоров'я, а й чистота довкілля. Звісно, що в сучасному світі важко уявити продукти виробництва без додавання хімічних домішок. Однак, на щастя, люди все більше замислюються про користь еко-продуктів та еко-сировини [1]. Разом з цим виробники швидко реагують на зміни у споживчому попиті та переходять на виготовлення екологічно чистої продукції. Технологічні еко-фактори суттєво впливають на формування ціни виробу. На жаль, не кожна людина має фінансові можливості купувати екологічно безпечний одяг внаслідок його високої вартості. Тому питання побічних реакцій організму на шкідливі складові текстильних матеріалів й досі залишається відкритим. На сьогодні значна частка відомих у всьому світі компаній з виготовлення одягу вже перейшли на використання екологічно чистої сировини, серед яких: ZARA; LACOSTE; H &M; ASOS; PATAGONIA та багато інших. Відомо, що до 2020 року цих брендів має бути вже 64 [2].

Постановка завдання

Серед дітей головною вимогою в дизайні одягу безперечно є його яскравість, неординарність, привабливий зовнішній вигляд. Натомість батьки при здійсненні вибору одягу для дитини ясельного та дошкільного віку не переймаються яскравістю кольорів, а акцентують свою увагу на його якості, зручності, гіпоалергенності, екологічності та безпечності. Тому при розробці асортименту одягу для дітей слід віддавати перевагу текстильним матеріалам з натуральної сировини, обирати неординарні їх структури, використовувати яскраві кольори, але при цьому не забувати про екологічність пофарбування сировини,

використовувати цікаві декоративні елементи та зручні конструкції.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

У статті [3] зазначається про вплив кольору на розвиток дитини та необхідність при здійсненні вибору кольорової гами опиратися на наукове обґрунтування, яке враховує вік дитини та призначення одягу. Психологами виявлено, що на відміну від дорослих червоний, жовтий та інші яскраві кольори дітей молодшого віку ці кольори не дратують, а навіть, навпаки, заспокоюють, дозволяють дитині почувати себе комфортно. Питанню емоційного впливу кольору в одязі на психологічний стан дитини присвячена робота [4]. У роботі представлено результати досліджень щодо відмінності у колірних вподобаннях дівчаток та хлопчиків. Автори зазначають, що нервова система здорової дитини об'єктивно потребує енергетичного впливу переважно довгохвильової частини спектру, саме тому яскраві, світлі відтінки позитивно впливають та гармонізують центральну нервову систему.

Авторами статті [5] на прикладі дівчаток молодшої вікової групи обґрунтовано психологічну комфортність одягу. У роботі викладено результати досліджень споживчих переваг. Розроблено структуру раціонального гардеробу за ознакою базових комплектів.

Для виготовлення дитячого одягу, особливо який безпосередньо дотикається до тіла, найкраще застосовувати екологічно чисту сировину [6]. Крім того, одяг для дітей ясельного та дошкільного віку повинен проходити обов'язкову перевірку на наявність шкідливих домішок відповідно до існуючих стандартів. Робота [7] присвячена аналізу номенклатури показників якості для дитячого одягу. Запропонована більш детальна класифікація номенклатури показників якості одягу для дітей молодших вікових груп з урахуванням сучасних споживних вимог. На підставі проведеного аналізу вимог нормативних документів до швейних виробів дитячого асортименту авторами рекомендовано гармонізувати державні стандарти на відповідність єдиних вимог, взявши за основу вимоги міжнародних стандартів ЕКО-ТЕХ-100, що дозволяють оцінити екологічну безпечність виробів для дітей.

В умовах стрімкого розвитку хімічних технологій, що з одного боку дають світу нові інноваційні матеріали, а з іншого завдають шкоди людському організму та навколишньому середовищу, питання екологічної безпечності текстильних матеріалів і одягу набуває особливої актуальності. У зв'язку з цим набирає обертів мода на вироби з еко-сировини. При цьому думка щодо екологічності виробів з натуральної сировини є достатньо упередженою, оскільки натуральна сировина, виробництво якої передбачає використання хімічних речовин, може бути екологічно небезпечною і шкідливою для здоров'я людини.

До екологічно чистих волокон відносять органічно чисту бавовну; кукурудзяні; кропив'яні; бамбукові; лляні та конопляні та багато інших видів волокон. Особливу увагу слід звернути на лляні волокна, які відомі ще з далекої давнини. Волокна льону мають ряд унікальних фізико-механічних, медико-біологічних, психо-емоційних властивостей. Текстильний матеріал, виготовлений з льону має чудову повітропроникність, він «дихає» і забезпечує доступ повітря до тіла. Завдяки гігроскопічності лляного волокна текстильний матеріал виводить вологу від тіла, але при цьому швидко сохне, не утворюючи парникового ефекту на тілі людини. Тому лляні текстильні матеріали використовують у виробництві весняно-літнього асортименту одягу. Вироби з льону також мають психо-емоційний вплив на людину. Основна властивість його енергетики – пробуджувати в людях почуття зібраності та спокою. Тому це ідеальний матеріал у виготовленні одягу для гіперактивних дітей. Крім того волокна льону здатні гальмувати ріст мікроорганізмів, включаючи і патогенні їх види; володіють підвищеним гемостатичним ефектом; благотворно впливають на шкіру людини та її імунітет [8].

Автори роботи [9] називають льон та текстильні матеріали на його основі найбільш вишуканим видом матеріалів для деяких видів літнього одягу та білизни. Застосуванню та основним властивостям льону присвячена робота [10]. Авторами складено за результатами досліджень порівняльну характеристику фізико-механічних та гігієнічних властивостей текстильних матеріалів з лляних та бавовняних волокон. Одним із позитивних факторів є те, що в Україні можливе вирощення льону, що дасть змогу покращити ринок текстильної сировини. Однак, як зазначається у роботі [11], для реалізації такого роду проекту потрібна підтримка на державному рівні.

Таким чином, розробка асортименту функціональних виробів для дітей ясельної та дошкільної групи з використання екологічно безпечних текстильних матеріалів є актуальною задачею, вирішення якої базується з одного боку на аналізі вимог до даної асортиментної групи виробів, з іншого боку – модних тенденцій, вподобань дітей та рекомендацій батьків.

Результати та їх обговорення

Намагаючись поєднати уподобання дітей, вимоги батьків й модні тенденції в одязі для дітей [12, 13] та разом з тим розшити асортимент трикотажного одягу для дітей ясельної та дошкільної групи, нами запропоновано ескізні проекти п'яти одиниць трикотажних виробів повсякденного призначення для дівчаток дошкільного віку весняно-літнього сезону експлуатації, представлені на рис. 1.

Особливістю дизайну виробів є вільний крій та завищена лінія талії за рахунок наявності кокетки, що забезпечує динамічну свободу дитини під час рухливої гри. Моделювання даних виробів проведено у відповідності до антропологічних особливостей дитини. У даному ескізному проекті присутні ритмічні поєднання смуг червоного та рожевого кольору, контраст у кольорі, симетрія у виробах. Домінує у виробах червоний колір. Даний колір має своє символічне значення – це найгарячіший колір, колір любові, як співалося у відомій українській пісні. Також червоний має свою психологічну дію на людину, а особливо

дитину. Він активізує увагу, підвищує працездатність, рухову активність. Це колір енергії та жвавості. Однак надмірне використання червоного пригнічує та викликає агресію. Тому для доповнення цілісного образу та зменшення агресивного впливу червоного кольору було додано рожевий колір, який заспокоює та надає стійкості до стресу [14]. Одяг з таким імпульсивним та яскравим кольором як червоний найкраще одягати для млявих та неактивних дітей, і тоді вони себе будуть почувати у центрі уваги та впевнено, і у зв'язку з цим активність дитини буде прогресувати.

модель 1 **модель 2** **модель 3** **модель 4** **модель 5**

Рис. 1. Ескізний проект асортименту трикотажних виробів для дівчаток дошкільного віку

Трикотажні полотна завдяки своїй петельній структурі та достатній розтяжності мають чудову пористість, повітропроникність, паропроникність та інші властивості й ідеально підходять для виготовлення дитячого одягу весняно-літнього асортименту. Використання екологічно безпечної лляної пряжі забезпечить гігієнічність та безпечність виробів для дітей ясельного та дошкільного віку. Для виготовлення дитячого весняно-літнього асортименту одягу для дому, що є першим шаром, який безпосередньо контактує з ніжною шкірою дитини, нами запропоновано використати структуру переплетення гладь та перехресного на базі подвійного напівфангу. Особливістю одержаної структури перехресного переплетення є наявність наскрізних чарунок, що забезпечать підвищення рівня повітропроникності виробу.

Трикотажні полотна вироблено на плосков'язальному обладнанні 10 класу. Характеристику розроблених полотен наведено у таблиці 1. За поверхневою густиною дані полотна відповідають весняно-літньому асортименту.

Таблиця 1

Зразки трикотажних полотен

Вид структури	Назва переплетення	Заправні дані: вид пряжі, лінійна густина, текс	Щільність по горизонталі, пет. ст.	Щільність по вертикалі, пет. р.	Поверхнева густина г/м^2
зразок 1	гладь	пряжа лляна 33 текс×2	64	80	207,8
зразок 2	перехресне на базі подвійного напівфангу	пряжа лляна 33текс ×2	75	53	249,8

Для виявлення рівня комфортності та підтвердження відповідності розроблених зразків трикотажу обраній асортиментній групі у ході досліджень встановлено наступні їх споживні характеристики: зміна лінійних розмірів після прання та сушіння, капілярність, повітропроникність, деформаційні властивості. Дослідження показали, що полотна мають деяку усадку після прання по ширині та довжині незалежно від структури переплетення. Як видно з діаграм, представлених на рис. 2, більший рівень усадки у зразків, вироблених переплетенням гладь, а саме по довжині в 1,7 разу, по ширині – 2,4 разу. Одержані значення усадки дослідних зразків слід урахувати при проектуванні виробів.

Для весняно-літнього асортименту виробів для дітей важливою характеристикою є капілярність трикотажних полотен, адже такі вироби повинні добре поглинати вологу з тіла у спекотну погоду та швидко її випаровувати, не утворюючи парникового ефекту у підодяговому просторі. Капілярність дослідних зразків трикотажу (рис. 3) є досить висока за рахунок використання гігроскопічної пряжі з льону.

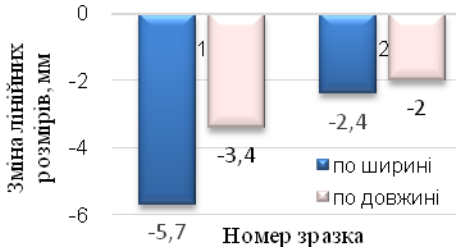


Рис. 2. Діаграми зміни лінійних розмірів після прання

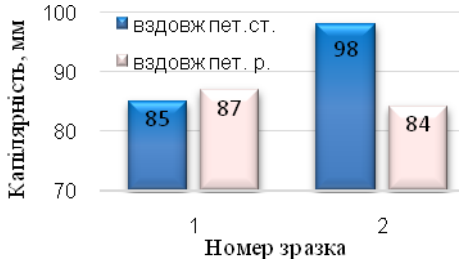


Рис. 3. Діаграми підняття рідини в структурі трикотажу на 60 хвилині досліду

Як видно з діаграм (рис. 3), рівень капілярності дослідних зразків вздовж петельного ряду майже однаковий. Однак за рахунок чарунок, які наявні у петельній структурі перехресного переплетення, рівень капілярності вздовж петельних стовпчиків на 15,3% вищий порівняно з гладдю. Це слід враховувати при використанні того чи іншого переплетення для окремих конструктивних елементів швейного виробу.

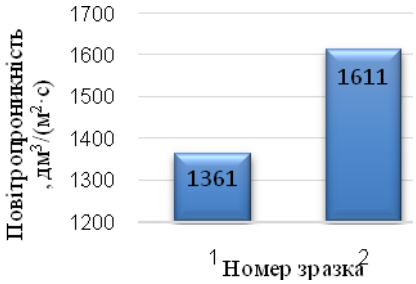


Рис. 4. Діаграми повітропроникності розроблених зразків трикотажних полотен

Однією з важливих характеристик текстильних матеріалів для одягу є його повітропроникність – обмін повітря з навколишнього середовища безпосередньо до тіла людини і навпаки. За результатами дослідження повітропроникності розроблених зразків трикотажу побудовано діаграми (рис. 4), які наглядно ілюструють рівень їх повітропроникності.

З графіків видно, що рівень повітропроникності досліджуваних трикотажних полотен є досить високий, що пояснюється використанням «дихаючої» пряжі з льону. Крім того, зразок трикотажу перехресного переплетення перевищує рівень повітропроникності зразка трикотажу, виробленого гладдю на 18,4%. Це пояснюється структурою переплетення, адже в структурі перехресного переплетення присутні чарунки, крізь які проходить повітря. Висока повітропроникність у даному випадку є позитивною властивістю. Одяг виготовлений з таких трикотажних полотен добре пропускатиме повітря до тіла людини, забезпечуватиме його вентиляцію у підодяговому просторі. Це дозволить уникнути перегріву тіла дитини у спекотну погоду.

Деформаційні властивості також є фактором, на який слід звертати увагу при виборі текстильного матеріалу для одягу певної асортиментної групи. На рис. 5–7 наведено результати досліджень деформації та релаксації деформації розтягу дослідних зразків трикотажу.

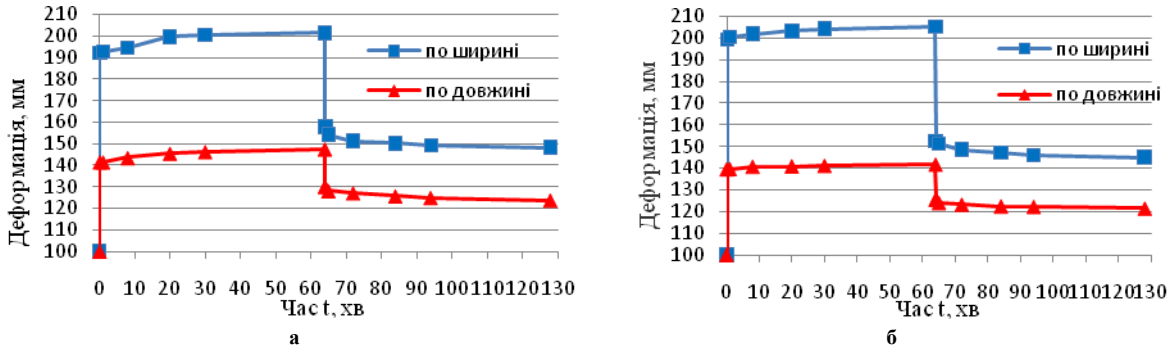
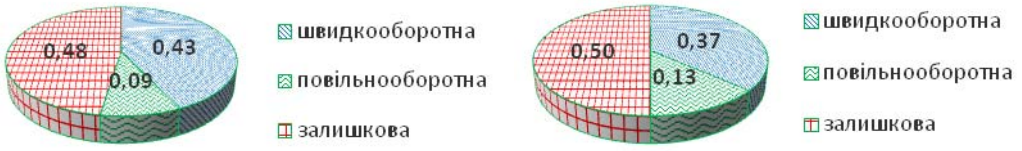


Рис. 5. Графіки деформації та релаксації деформації розтягу дослідних зразків трикотажу: а – зразок 1; б – зразок 2

Як видно з графіків (рис. 5) на рівень повної деформації впливає структура переплетення. Внаслідок наявності чарунок в структурі трикотажу перехресного переплетення зростає величина повної деформації як по ширині, так і по довжині.

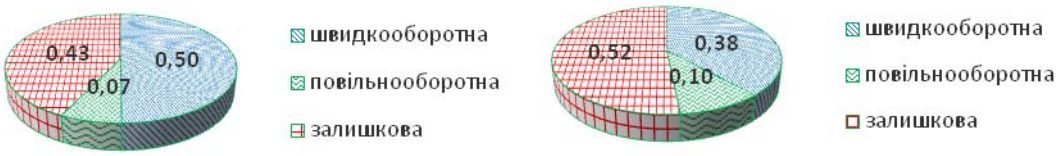
Кругові діаграми (рис. 6-7) наглядно ілюструють, що частка залишкової деформації в обох досліджуваних зразках досить висока.

Завдяки наявності в структурі перехресного переплетення нахилених петель до лінії петельного ряду величина залишкової деформації по ширині зменшується. На частку залишкової деформації по довжині не впливає структура переплетення. Значна частка залишкової деформації розроблених зразків трикотажних полотен не є позитивною характеристикою, адже під час експлуатації виробів з них це може призвести до швидкої зміни їх лінійних розмірів. Це пояснюється використанням лляної пряжі, яка характеризується жорсткістю на згин і значним коефіцієнтом тертя, що ускладнює зворотній процес перерозподілу нитки в петлях під час релаксації деформації. Однак особливістю трикотажу, виробленого з чисто лляної пряжі, є відновлення його лінійних розмірів після прання та сушіння.



а б

Рис. 6. Складові частки повної деформації при розтягуванні зразка трикотажу переплетення гладь (а – по ширині; б – по довжині)



а б

Рис. 7. Складові частки повної деформації при розтягуванні зразка трикотажу перехресного переплетення (а – по ширині; б – по довжині)

У якості промислового зразка з використанням зазначених структур переплетень спроектовано та виготовлено комплект трикотажних виробів весняно-літнього асортименту повсякденного призначення для дівчаток дошкільного віку (рис. 8).

Рис. 8. Трикотажний виріб

Комплект складається з туніки та шорт. Шорти, кокетка та спинка туніки вироблені переплетенням гладь; пілочка та рукава – перехресним переплетенням на базі подвійного напівфангу з вимкненими з роботи голками. За конструкцією трикотажні вироби, що складають комплект, вільного силуету, не приталені та зручні у використанні як вдома, так і в групі дошкільного навчального закладу. Наявність кокетки забезпечує створення завищеної лінії талії та підвищення рівня комфортності з позиції свободи рухів дитини. Еластична стрічка у поясі шорт не створює надмірного тиску на живіт дитини. Шви у виробах не грубі [15].

Початок в'язання кожної деталі виробів відбувається переплетенням трубчаста гладь. Кокетка та низ шортів виконані ритмічним поєднанням смужок рожевого та червоного кольорів. Колористичне рішення базується на поєднанні яскравого, контрастного червоного кольору та спокійного рожевого.

Висновки

Розробка асортименту функціонального одягу для дітей є специфічною задачею. З одного боку слід дослухатися до вподобань юних споживачів й опиратися на тенденції моди, з іншого враховувати побажання батьків щодо його комфортності, гігієнічності та екологічної безпечності. Одяг не повинен завдавати незручностей дитині, викликати подразнення шкіри. При цьому він має бути привабливим зовні та комфортним, щоб дитина з радістю та щоразу без вередувань одягала його.

У роботі здійснено ескізне проектування дитячих трикотажних виробів весняно-літнього асортименту для дівчаток дошкільного віку. Запропоновано структуру переплетень для виготовлення виробів. У якості екологічно безпечної сировини обрано лляну пряжу. Досліджено споживні характеристики розроблених зразків трикотажних полотен. В матеріалі у якості промислового зразка виготовлено одну з моделей: комплект трикотажних виробів, що складається з туніки та шорт. Витрати сировини на комплект складають 182 г.

Література

1. Батрак О. А. Перспективи формування асортименту екологічно-безпечних текстильних матеріалів та виробів / О. А. Батрак, Л Є. Галавська // Матеріали III-ї Міжнар. наук.-практ. конф. «Проблеми формування асортименту, якості і екологічної безпечності товарів», тематичний напрям «Вплив сировинних ресурсів на формування екологічної безпечності товарів» (Львів, 12 листопада 2015 р.). – Львів : Вид-во "Растр-7". – 2015. – С. 54–57.

2. Самые популярне бренды одежды до 2020 года перейдут на экологическое производство [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://24tv.ua/lifestyle/ru/samye_populjarnye_brendy_odezhdy_do_2020_ goda_perejdut_na_jekologicheskoe_proizvodstvo_n916686

3. Гайдашевська О.Б. Сприйняття психологічного аспекту кольору в проектуванні дитячого одягу / О.Б. Гайдашевська, А.Л. Словінська // Вісник ХНУ – 2011. – № 3. – С. 69–72.

4. Мєраджи Н.В. Дослідження емоційного впливу кольору в проектуванні одягу на психологічний стан дітей / Н.В. Мєраджи, І.В. Христюк, Л.В. Кондратьєва // Молодь – науці і виробництву – 2018: Інноваційні технології легкої промисловості : матеріали міжнародної науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених, м. Херсон, 17-18 травня 2018 року. – Херсон : ХНТУ, 2018. – С. 111–113.

5. Гайдашевська О.Б. Методика розробки структури раціонального гардеробу одягу для дівчаток молодшої шкільної групи / О.Б. Гайдашевська, А.Л. Словінська // Вісник Хмельницького національного університету. – 2012. – № 4. – С. 159–162.

6. Батрак О. А. Екологізація сучасного асортименту текстильних виробів / О. А. Батрак, В. В. Шахман, Л. Є. Галавська // Тези доповідей Міжнародної науково-практичної конференції "Сучасний стан легкої і текстильної промисловості: інновації, ефективність, екологічність" (28–30 жовтня 2015 р.). – Херсон : Видавництво ХНТУ, 2015. – С. 16–17.

7. Ярощук О.В. Аналіз нормативних документів для виготовлення та експертизи швейних виробів дитячого асортименту / О.В. Ярощук // Вісник Хмельницького національного університету. – 2011. – №1. – С. 252–256.

8. Батрак О. А. Розробка екологічного та безпечного трикотажу для дитячих виробів білизняного та спортивного призначення / О. А. Батрак, О. В. Гнатюк, Л. Є. Галавська // Молодь – науці і виробництву – 2018: Інноваційні технології легкої промисловості : матеріали міжнародної науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених, м. Херсон, 17-18 травня 2018 року. – Херсон : ХНТУ, 2018. – С. 34–36.

9. Бекещенко Д.А. Использование льносодержащих материалов для проектирования новых моделей женских курток / Д.А. Бекещенко, Е.В. Бондарева, Е.М. Лабацкая // Молодь – науці і виробництву – 2018: Інноваційні технології легкої промисловості : матеріали міжнародної науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених, м. Херсон, 17-18 травня 2018 року. – Херсон : ХНТУ, 2018. – С. 39-40.

10. Буряченко А.М. Застосування та основні властивості льону. Порівняльна характеристика фізико-механічних показників лляних та бавовняних полотен / А.М. Буряченко, В.А. Барабаш, О.І. Христюк // Молодь – науці і виробництву – 2018: Інноваційні технології легкої промисловості : матеріали міжнародної науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених, м. Херсон, 17-18 травня 2018 року. – Херсон : ХНТУ, 2018. – С. 164-165.

11. Березовський Ю.В. Оцінка необхідності розвитку та підтримки виробництва екологічно безпечної лляної продукції в Україні / Ю.В. Березовський// Вісник ХНТУ. – 2014. – № 2(49). – С. 51–55.

12. Пахомова Т.А. Детская мода вчера и сегодня / Т.А. Пахомова, В.В. Гетманцева // Швейная промышленность. – 2009. – № 6. – С. 34–36.

13. Струмінська Т.В. Особливості проектування святкового одягу для дівчат / Т.В. Струмінська, Т.А. Пашковська, К.В. Кабанець // Вісник Хмельницького національного університету. – 2018. – Том 2. – № 6. – С. 80–83.

14. Вплив кольорів на всебічний розвиток дитини та стабілізацію психоемоційного стану дошкільнят [Електронний ресурс] / Буданцева Н.І. – Режим доступу : https://doshkilnyk.in.ua/stattja-vplyv-koloriv-na-vsebichnyj-rozvytok-dytyny-ta-stabilizaciju-psyhoemocijnoho-stanu-doshkilnjat/

15. Лисак Н. В. Розробка технології та сучасного дизайну дитячих верхніх трикотажних виробів [Електронний ресурс] / Н. В. Лисак, Л. Є. Галавська // Технології та дизайн. – 2017. – № 3 (24). – Режим доступу : http://nbuv.gov.ua/UJRN/td_2017_3_11

References

1. Batrak O. A. Perspektyvy formuvannia asortymentu ekolohichno-bezpechnykh tekstylnykh materialiv ta vyrobiv / O. A. Batrak, L Ye. Halavska // Materialy III-yi Mizhnar. nauk.-prakt. konf. «Problemy formuvannia asortymentu, yakosti i ekolohichnoi bezpechnosti tovariv», tematychnyi napriam «Vplyv syrovynnykh resursiv na formuvannia ekolohichnoi bezpechnosti tovariv» (Lviv, 12 lystopada 2015 r.). – Lviv : Vyd-vo "Rastr-7". – 2015. – S. 54–57.

2. Samye populjarne brendy odezhdy do 2020 goda perejdut na jekologicheskoe proizvodstvo [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu : https://24tv.ua/lifestyle/ru/samye_populjarnye_brendy_odezhdy_do_2020_ goda_perejdut_na_jekologicheskoe_proizvodstvo_n916686

3. Haidashevska O.B. Spryiniattia psykholohichnoho aspektu koloru v proektuvanni dytiachoho odiahu / O.B. Haidashevska, A.L. Slovinska // Herald of Khmelnytskyi National University – 2011. – № 3. – S. 69–72.

4. Mieradzhy N.V. Doslidzhennia emotsiinoho vplyvu koloru v proektuvanni odiahu na psykholohichnyi stan ditei / N.V. Mieradzhy, I.V. Khrystiuk, L.V. Kondratieva // Molod – nautsi i vyrobnytstvu – 2018: Innovatsiini tekhnolohii lehkoi promyslovosti : materialy mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii zdobuvachiv vyshchoi osvity i molodykh uchenykh, m. Kherson, 17-18 travnia 2018 roku. – Kherson : KhNTU, 2018. – S. 111–113.

5. Haidashevska O.B. Metodyka rozrobky struktury ratsionalnoho harderobu odiahu dlia divchatok molodshoi shkilnoi hrupy / O.B. Haidashevska, A.L. Slovinska // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. – 2012. – № 4. – S. 159–162.

6. Batrak O. A. Ekolohizatsiia suchasnoho asortymentu tekstylnykh vyrobiv / O. A. Batrak, V. V. Shakhman, L. Ye. Halavska // Tezy dopovidei Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii "Suchasnyi stan lehkoi i tekstylnoi promyslovosti: innovatsii, efektyvnist, ekolohichnist" (28–30 zhovtnia 2015 r.). – Kherson : Vydavnytstvo KhNTU, 2015. – S. 16–17.

7. Iaroshchuk O.V. Analiz normatyvnykh dokumentiv dlia vyhotovlennia ta ekspertyzy shveinykh vyrobiv dytiachoho asortymentu / O.V. Yaroshchuk // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2011. – №1. – S. 252–256.

8. Batrak O. A. Rozrobka ekolohichnoho ta bezpechnoho trykotazhu dlia dytiachykh vyrobiv bilyznianoho ta sportyvnoho pryznachennia / O. A. Batrak, O. V. Hnatiuk, L. Ye. Halavska // Molod – nautsi i vyrobnytstvu – 2018: Innovatsiini tekhnolohii lehkoi promyslovosti : materialy mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii zdobuvachiv vyshchoi osvity i molodykh uchenykh, m. Kherson, 17-18 travnia 2018 roku. – Kherson : KhNTU, 2018. – S. 34–36.

9. Bekeshhenko D.A. Ispol'zovanie l'nosoderzhashhih materialov dlja proektirovanija novyh modelej zhenskih kurtok / D.A. Bekeshhenko, E.V. Bondareva, E.M. Labackaja // Molod' – nauci i virobnictvu – 2018: Innovacijni tehnologiї legkoї promislovosti : materiali mizhnarodnoї naukovo-praktichnoї konferencії zdobuvachiv vishhoї osviti i molodih uchenih, m. Herson, 17-18 travnja 2018 roku. – Herson : HNTU, 2018. – S. 39-40.

10. Buriachenko A.M. Zastosuvannia ta osnovni vlastyvosti lonu. Porivnialna kharakterystyka fizyko-mekhanichnykh pokaznykiv llianykh ta bavovnianykh poloten / A.M. Buriachenko, V.A. Barabash, O.I. Khrystiuk // Molod – nautsi i vyrobnytstvu – 2018: Innovatsiini tekhnolohii lehkoi promyslovosti : materialy mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii zdobuvachiv vyshchoi osvity i molodykh uchenykh, m. Kherson, 17-18 travnia 2018 roku. – Kherson : KhNTU, 2018. – S. 164-165.

11. Berezovskyi Yu.V. Otsinka neobkhidnosti rozvytku ta pidtrymky vyrobnytstva ekolohichno bezpechnoi llianoi produktsii v Ukraini / Yu.V. Berezovskyi// Visnyk KhNTU. – 2014. – № 2(49). – S. 51–55.

12. Pakhomova T.A. Detskaia moda vchera y sehodnia / T.A. Pakhomova, V.V. Hetmantseva // Shveinaia promыshlennost. – 2009. – № 6. – S. 34–36.

13. Struminska T.V. Osoblyvosti proektuvannia sviatkovoho odiahu dlia divchat / T.V. Struminska, T.A. Pashkovska, K.V. Kabanets // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2018. – Tom 2. – № 6. – S. 80–83.

14. Vplyv koloriv na vsebichnyi rozvytok dytyny ta stabilizatsiiu psykhoemotsiinoho stanu doshkilniat [Elektronnyi resurs] / Budantseva N.I. – Rezhym dostupu : https://doshkilnyk.in.ua/stattja-vplyv-koloriv-na-vsebichnyj-rozvytok-dytyny-ta-stabilizaciju-psyhoemocijnoho-stanu-doshkilnjat/

15. Lysak N. V. Rozrobka tekhnolohii ta suchasnoho dyzainu dytiachykh verkhnikh trykotazhnykh vyrobiv [Elektronnyi resurs] / N. V. Lysak, L. Ye. Halavska // Tekhnolohii ta dyzain. – 2017. – № 3 (24). – Rezhym dostupu : http://nbuv.gov.ua/UJRN/td_2017_3_11

Рецензія/Peer review : 10.01.2019 р. Надрукована/Printed :15.2.2019 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Березненко С.М.

DOI 10.31891/2307-5732-2019-269-1-70-76
УДК 687.016:687.12

М.С. ВИННИЧУК, Т.В. ЛУЦКЕР, М.А. ЛАЗАРЧУК, О.О. ПІДДУБНА
Київський національний університет технологій та дизайну

ДИЗАЙН-ПРОЕКТУВАННЯ МОДЕЛЕЙ КОЛЕКЦІЇ ЖІНОЧОГО ОДЯГУ В СТИЛІ «МІЛІТАРІ» ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ПЛОСКОГО ВИДУ ОЗДОБЛЕННЯ

У статті проаналізовано художньо-проектні характеристики моделей колекції жіночого одягу в стилі «мілітарі» із застосуванням плоского виду оздоблення. В процесі дослідження виділені основні ознаки стилю «мілітарі», проведено аналіз існуючих модних тенденцій. Досліджено всі існуючі види оздоблення та більш детально розглянуто плоский вид оздоблення, а саме – авторський художній розпис, адже він є в даному сезоні трендовим. Плоске оздоблення виконується безпосередньо на поверхні деталей виробу, при цьому просторова форма матеріалу не змінюється. Ці дослідження можна використовувати для подальшої розробки колекції жіночого одягу. Кінцевим результатом проведеної роботи стала розробка колекції «НЕЗЛАМНА». Основою цієї колекції є взаємозв'язок образу, стилю, форм, матеріалів, декоративного та конструктивно-технологічного рішень всіх елементів, характерних для стилю «мілітарі» із застосуванням трендового виду оздоблення.

Ключові слова: *стиль «мілітарі», хакі, військова форма, оздоблення, авторський художній розпис, принт, трендовий вид оздоблення.*

M.S. VYNNYCHUK, T.V. LUTSKER, M.A. LAZARCHUK, O.O. PIDDUBNA
Kyiv National University of Technology and Design

DESIGN OF COLLECTIONS OF WOMEN'S CLOTHING IN THE MILITARY STYLE WITH USE OF FLAT DECORATION

The article analyzes the artistic and design characteristics of models of women's clothing collection in the military style with use of flat decoration. Fashion trends were analyzed and determined that the style of "Military" in the autumn-winter 2018-2019 gaining popularity, the world's leading designers are developing their collections in this style. In the course of research, the main features of the military style are identified: the presence of or the imitation of the chases; stripes on the pants; military jacket with ribbons in the form of orders and military symbols; metallic buttons of large diameter which depict the symbols of the army; leather straps with massive buckles; trousers; shirts and blouses with a collar-stand; coats and jackets of equal cut. It is determined that the assortment of decoration used in the production of modern women's, men's and children's clothes from various materials is quite diverse. For the decoration of clothes used as traditional, long-known species, as well as new, non-traditional, associated with the properties of specific materials and the emergence of new technologies of finishing decoration. A more detailed look at the flat kind of decoration, namely, the author's art painting, since it is trendy this season. Flat decoration is performed directly on the surface of the product details, while the spatial shape of the material does not change. Author's art painting breaks into the fashion world rapidly and fills it with products with exclusive and unique images, since it is almost impossible to create an identical picture manually. Probably, this gives such products a high competitiveness in the fashion industry, as a potential buyer is currently very discerning and wants to stand out among others. Having analyzed the fashion trends in styles and clothes, it is possible to assume that designing a military-style collection using a flat type of decoration, namely, the author's artistic textile decoration, will be very successful. These studies can be used to further develop a collection of women's clothing.

Key words: *militarist style, hacks, military form, decoration, author's painting, print, trendy kind of decoration.*

Вступ

На сьогоднішній день мода є однією з найприбутковіших сфер бізнесу, яка постійно розвивається, відповідно – зростає конкуренція в модному бізнесі і відбувається постійна активна боротьба за споживача. Тому важливим моментом в сучасному виробництві одягу є розробка нових колекцій одягу, які б відповідали модним тенденціям та виготовлялися з якісних матеріалів. Якщо ознайомитися з історією моди, можна побачити, як державні діячі, війни і революції, економічні кризи і науково-технічний прогрес формують модні тенденції. Саме тому стиль «мілітарі» (військовий стиль), схоже, надовго оселився на подіумах. Військова тема настільки явно читається в колекціях минулих і майбутнього сезонів, що проектування колекції в цьому стилі буде актуальним. Використання трендового виду оздоблення художній розпис, надасть проектованій колекції індивідуальності.

Постановка завдання

У сучасному світі костюм став живим елементом самовираження, тому дизайн нового часу має містити нові ідеї. Виникає необхідність проектування легко замінних, універсальних виробів аби задовольнити потреби споживача [1].

На сьогоднішній день досить важко здивувати та вразити споживача, оскільки все на світі, в самому своєму принципі ідентичності, зачеплено впливом моди – її здатністю переводити будь-які форми в стан безвладної повторюваності. Тому зараз є дуже актуальним створення авторських колекцій одягу, які б ідентифікували не лише автора як митця, але й покупця як особистість.

Результати дослідження

Одне із основних завдань, які стоять перед сучасним дизайнером, – це застосування досягнень науки, техніки та мистецтва у створенні вишуканого стилю жінки. Оздоблення виробів є достатньо значним досягненням, воно на сьогоднішній день дає можливість значно розширити асортимент швейних виробів, адже завдяки різноманітності його видів можна надати винятковості, привабливості та новизни старим речам, або ж створити ексклюзивний виріб.

В даній статті пропонується художньо-проектна характеристика колекції жіночого одягу в стилі

«мілітарі» із застосуванням плоского виду оздоблення.

Основними засобами об'єднання моделей в творчих колекціях є образні, асоціативні концепції дизайнерів: узгодження форм, пропорцій, ритму формотворчих елементів, колориту, а також об'єднання їх в цілісну систему. В цілому створення колекції передбачає наступний порядок:

• формується концепція на основі тренду, яка втілюється в колекції тканин, форм, конструктивно-декоративних елементів та інших матеріалів для створення колекції;

• створюються перспективні колекції високої моди, які демонструються за півроку до сезону, хоча запропоновані в них стилі та тенденції в масовій моді реалізуються пізніше;

• створюються та розробляються промислові масові колекції на основі тенденцій, показаних в колекціях haute-couture і prêt-a-porter.

Стиль «мілітарі», який отримав свою назву від англійського «military» (військовий), давно і міцно влаштувався, як у світі високої моди, так і в гардеробах звичайних людей, що в повній мірі описує основні особливості і напрям цієї модної течії.

Одним із важливих факторів виникнення нових видів одягу стали воєнні дії. Військовий одяг зажди впливав на зовнішній вигляд повсякденного костюма. З історії відомо, що військовий стиль з'явився під час Першої світової війни, коли всі фабрики виконували виключно військові замовлення, а на звичайний одяг не вистачало ні часу, ні коштів. Після закінчення військових дій залишилась велика кількість військової форми, яку звичайні мирні люди стали перешивати і пристосовувати для повсякденного життя.

Другий сплеск популярності стилю «мілітарі» припав на 1960-і роки, його вподобала тодішня молодь, тим самим, вони висловлювали свій протест проти військових дій у В'єтнамі. В ті ж роки з'явився рух хіпі, який також використовував елементи військового стилю в одязі, який носили, вважалось, що немає необхідності носити звичайні речі в країні, де кожний наступний ранок може розпочатися з піку військових подій.

Ближче до 2000-х років імениті дизайнери звернули увагу на військовий стиль, який прижився серед населення і користувався популярністю, у зв'язку з цим, були створені колекції, які викликали неабиякий фурор у світі високої моди. Таким чином, звичайний військовий одяг перейшов з вулиці на світові подіуми [2].

Сьогоднішні покази в military стилі відрізняються ще більшою оригінальністю моделей і нестандартним підходом до фасонів і силуетів. Від воєнізованих речей 60-70-х років минулого століття залишилися лише деякі риси. Сучасний верхній одяг з елементами military виготовляється з різноманітних тканин. У дизайнерів в пріоритеті м'який кашемір, твід, розкішна шерсть, трикотаж, котон і навіть атлас і шовк. Основні особливості жіночого військового стилю в одязі:

- наявність погонів або їх імітація;
- лампаси на штанях;
- куртка в стилі «мілітарі» з нашивками у вигляді орденів і військової символіки;
- металеві ґудзики великого діаметру, на яких зображені символи армії;
- шкіряні ремені з масивними бляхами;
- штани-галіфе;
- сорочки і блузки з коміром-стояком;
- пальта і жакети прямого силуету.

З військової форми в жіночий костюм увійшли шинелі, пальта з накладними кишенями, акцентовані застібки, аксесуари, комір-стояк, авіатор, взуття, яке має незначну схожість з військовими берцями. Популярність у світовій моді цей стильовий напрям отримав в 1980-і роки, коли Крістіан Діор і Луї Віттон представили світу свої перші колекції одягу в стилі «мілітарі». Завдяки творчому підходу талановиті дизайнери змогли брутальній військовій формі надати жіночності і вишуканості [3]. Стилізовані вироби, які можна віднести до стилю «мілітарі», представлено на рис. 1.

Рис. 1. Стилізація виробів з ознаками стилю «мілітарі»

Стиль «мілітарі» добре прослідковується в останніх колекціях від Christian Dior та Temperley London [4, 5]. Представлена колекція на Тижні моди в Парижі сезону осінь-зима 2018-2019 від Марії Грації Кьюрі натхненна естетикою 60-х. Завдяки декоратору Олександру де Бетаку модний показ перетворився в повномасштабне шоу, що відсилає до травневих подій у Франції 1968 року [4]. Комплекти колекції в яких чітко прослідковується стиль «мілітарі» представлено на рис. 2.

Рис. 2. Фрагменти колекції Dior «Червоний травень» осінь-зима 2018-2019рр.

Вся увага на декоративні деталі – це один з ключових моментів «мілітарі» в колекції Temperley London. Знаючи про привабливість військової форми, дизайнер Еліс Темперлі знову включається в гру зі стилем «мілітарі» [5], але цього разу велику увагу приділяє саме оздобленню (рис. 3).

Рис. 3. Фрагменти колекції Temperley London в стилі «мілітарі» сезону осінь-зима 2018-2019 рр.

Асортимент оздоблення, яке використовують при виготовленні сучасного жіночого, чоловічого та дитячого одягу з різних матеріалів, досить різноманітний. Для оздоблення одягу використовують як традиційні, давно відомі види, так і нові, нетрадиційні, пов’язані з властивостями конкретних матеріалів і з появою нових технологій виготовлення оздоблення.

Види оздоблення за способом виготовлення можна поділити на три групи: плоске оздоблення; об’ємне оздоблення; додаткові аксесуари.

Плоске оздоблення виконується безпосередньо на поверхні деталей виробу, при цьому просторова форма матеріалу не змінюється. До плоского оздоблення одягу належать:

- оздоблювальні строчки, які підкреслюють і роблять більш помітними конструктивні лінії, шви, краї деталей;
- оздоблення тасьмою, шнуром, сутажем, бахромою, бейкою тощо, які використовують для оздоблення країв деталей;
- вишивка ручна і машинна, яку виконують нитками, бісером, стеклярусом, перлинами, паєтками тощо;
- аплікація, виконана різними способами з різних матеріалів;
- оздоблення металевою, пластмасовою, дерев’яною та іншою фурнітурою (ґудзиками, пряжками, блочками, застібкою-блискавкою, гачками, кнопками тощо);
- комбінування різних матеріалів, поєднання тканин однієї фактури різних кольорів; тканин різних фактур одного кольору тощо;
- нанесення зображення на текстиль;
- інше оздоблення [6].

Провідним напрямком в області оздоблення є нанесення зображення на текстиль, яке з кожним

роком стає все популярнішим. Вироби оздоблені зображенням виглядають дуже ефектно і можуть надати винятковості навіть найпростішим виробам.

Основні види друку/нанесення зображення на текстиль:

- Трансферний друк. Виконується з використанням проміжного носія. Технологія термопереносу дозволяє наносити зображення на тканину або безпосередньо на готові вироби: одяг, сумки, парасольки тощо.
- Шовкографія. Принцип друку методом шовкографії полягає в нанесенні фарби на текстиль через трафарет.
- Сублімація (трафаретний трансфер). При сублімації фарба під температурним впливом переходить з рідкого стану в газоподібний і потім проникає у верхній шар волокон зафарбовуваного текстильного полотна. Малюнок виходить практично фотографічної якості [7].
- Авторський художній розпис текстильних виробів вручну. Кожна річ є ексклюзивною і виконується пензликом вручну акриловими фарбами.

Авторський художній розпис швидкими темпами вривається в світ моди і заповнює його виробами з ексклюзивними та неповторними зображення, адже майже нереально створити ідентичні малюнки вручну. Напевно, саме це надає таким виробам високу конкурентоспроможність у фешн-індустрії, так як потенційний покупець в даний час є дуже вибагливим та хоче вирізнятися з поміж інших [8].

Протягом останніх декількох років в світі почали виникати бренди, які працюють виключно з таким видом оздоблення. Використання цього виду дає можливість молодому бренду створити сучасний та оригінальний одяг. Наприклад, український бренд NYMPH DRESSES займається виготовленням одягу з авторським розписом і акцентує увагу саме на ньому. У NYMPH не буває індивідуального пошиву без розпису – це не ательє, а бренд одягу, який створюється винятково з тканин, розписаних вручну (рис. 4). Також є варіант створення унікального виробу з ексклюзивним малюнком [9].

Рис. 4. Фрагменти авторських принтів бренду NYMPH DRESSES та виробів з їх використанням

Творчий акт створення колекції завжди починається з визначення теми, що обумовлює образність майбутніх виробів. Цей етап проектування надзвичайно важливий, тому що правильний вибір теми багато в чому забезпечує актуальність і успіх завершеної роботи. Наступним етапом є накопичення інформаційного матеріалу, який стосується даної теми. Для цього художник-модельєр збирає необхідні відомості, вивчає їх, аналізує за допомогою виконання замальовок і копій різних першоджерел. На основі вивчення накопиченої інформації в художника-модельєра виникає образне рішення проектованого костюма чи цілої колекції, яку він втілює в ескізах, колажах. Цим роботам притаманна своя графічна манера, ступінь умовності і міра відображення форми, матеріалу, конструкції майбутнього костюма.

Проаналізувавши модні тенденції в стилях та оздобленні одягу, можна припустити, що проектування колекції в стилі «мілітарі» з використанням плоского виду оздоблення, а саме – авторський художній розпис текстильних виробів, буде вдалим. Авторська колекція моделей жіночого одягу в стилі «мілітарі» розрахована для молодих жінок віком від 18 до 29 років, які завжди знаходиться у русі та в центрі уваги.

Художній образ людини у костюмі – це проектний образ, який визначається призначенням і ситуацією використання. За визначенням, проектний образ – це художня модель, яка відображає реальний світ; цілісна, свідома і завершена у своїй будові художня форма, яка має предметний зміст. Пошук образної виразності костюму залежить від особистого бачення дизайнера і його спроможності втілювати будь-які явища оточуючого середовища у різноманітні форми і образи в костюмі.

Передумовою для розробки моделей колекції жіночого одягу є створення планшету ідей або дошки настрою з метою виділення характерних ознак творчого джерела. При складані планшету ідей використовуються фотографії жінок у стилізованій військовій формі, аксесуари та малюнки пін-ап, що стало джерелом натхнення. Пін-ап, пінап (англ. to pin up – приколювати (мається на увазі плакат, який приколюють на стіну)) – особливий стиль американської графіки, поширений в середині XX століття. Як

правило, це зображення красивої, найчастіше напівоголеної дівчини [10]. Планшет ідей для розробки колекції зображено на рис. 5.

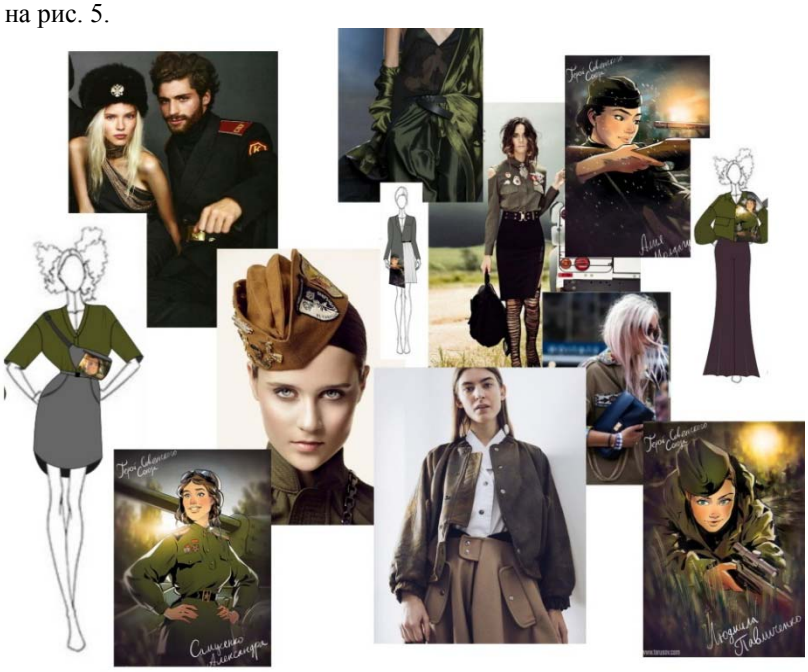


Рис. 5. Планшет ідей для розробки колекції «НЕЗЛАМНА»

Саме художньо-композиційні ознаки творчого джерела надають ідею силуетної форми майбутнього костюму. Подальше вивчення силуетної форми розвиває фантазію, дає матеріал та допомагає вирішити проблему гармонії функціонального та естетичного початку, збагачуючи формальні засоби гармонізації найбільш виразних пропорцій, ритму, симетрії-асиметрії, статичності, динамічності.

При дизайн-проектуванні авторської колекції одягу з використанням власних принтів творчим джерелом обрано пін-ап малюнки – портрети жінок військових [11]. Трансформація джерела натхнення відбувається з огляду на його виокремлені, переосмислені та розвинуті характеристики, після чого обирається спосіб їх перенесення на об’єкт дизайн-проектування, який зміг би максимально відобразити сутність та художнє значення образу колекції. Трансформацію творчого джерела представлено на рис. 6.

Рис. 6. Трансформації творчого джерела

Творчі ескізи конкретизують первинні задуми дизайнера, розвиваються шляхом подальшого вдосконалення і відпрацювання форми, вони мають уточнені пропорції, формотворні і декоративні лінії, колірне рішення, функціональну спрямованість. Для посилення художньої виразності ідеї, стиль костюмографічної мови творчих ескізів колекції вимагає відображення образу, манери носіння костюма, пластики фігури, знакових аксесуарів і доповнень. При системній розробці дизайнер проектує комплекти різноманітних, але функціонально і естетично взаємозв’язаних предметів, які, у свою чергу, є складником більш складних систем [12]. Ескізи моделей колекції побудовано за законами композиції із чітким опрацюванням пластики форм, силуету, застосуванням принципу пропорційності між елементами з продуманим використанням особливостей матеріалу, кольору, малюнка та фактури [13]. Колірне рішення моделей колекції обрано в результаті детального аналізу творчого джерела та матеріалів згідно тенденцій моди. При розробці колекції збережено пряму силуетну форму, що характеризує стиль «мілібарі», але з наданням образу більшої жіночності (рис. 7).

Проектована колекція складається з моделей весняно-літніх виробів різного асортименту, виду одягу, силуету, покрою, конструктивного рішення. Моделі колекції об'єднані між собою одним стильовим

задумом та використаними матеріалами, однак, мають різну конструктивну основу. Також проектовані вироби доповнюють один одного та становлять художню цілісність, утворюючи неповторний ансамбль. Колекція жіночого одягу в стилі «мілітарі» складається з комплектів, які містять блузки, спідниці, штани, сукню, куртку та тренч. Вироби гармонійно поєднанні між собою у комплекти за допомогою гармонійного поєднання кольорів та трендового виду оздоблення – авторський ручний розпис.

Рис. 7. Художні ескізи моделей одягу колекції «НЕЗЛАМНА»

На основі проведених досліджень магістрами кафедри ергономіки і проектування одягу КНУТД, Піддубною О. і Лазарчук М. було розроблено, виготовлено і представлено колекцію жіночого одягу в стилі «мілітарі» на міжнародному конкурсі молодих дизайнерів «Печерські каштани» (м. Київ, КНУТД, 2018 р.) під назвою «НЕЗЛАМНА». Зображення моделей авторської колекції представлено на рис. 8.

Рис. 8. Зображення моделей авторської колекції «НЕЗЛАМНА»

Висновки

В межах дослідження проаналізовано структурні, фактурні і пластичні властивості костюму в стилі «мілітарі», виокремлено обрані ознаки, характерні риси для стилю «мілітарі», впроваджено їх під час розробки колекції. Проведено аналіз існуючих модних тенденцій. Також, було проаналізовано види оздоблення за способом виготовлення, основні види нанесення зображення на текстиль, а також обрано для виготовлення колекції плоский вид оздоблення, а саме – авторський ручний розпис. Кінцевим результатом проведеної роботи стала розробка колекції «НЕЗЛАМНА». Основою цієї колекції є взаємозв'язок образу, стилю, форм, матеріалів, декоративного та конструктивно-технологічного рішень всіх елементів,

характерних для стилю «мілітарі» із застосуванням трендового виду оздоблення.

Література

1. Манцевич А. Ю. Совершенствование методов трансформативного формоообразования в дизайне костюма [Електронний ресурс] : дисс. … канд. техн. наук : специальность – 17.00.06 / А.Ю. Манцевич – М., 2013. – 268 с.

2. На валовій: Зухвалий стиль мілітарі в жіночому одязі [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://valova.te.ua/2014/12/zuhvalyj-styl-militari-v-zhinochomu-odyazi/

3. Колосніченко М.В. Мода і одяг. Основи проектування та виробництва одягу / М.В. Колосніченко, К.Л. Процик. – Київ : КНУТД, 2011. – 238 с.

4. YOU IN FASTION: Колекція Christian Dior осінь-зима 2018-2019. На згадку про студентські протести 1968 року в Парижі [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://youinfashion.com.ua/fashion/clothing-collections/kollekciya-christian-dior-osen-zima-2018-2019-v-pamyat-o-studencheskix-protestax-1968-goda-v-parizhe/

5. MYLITTA: Изысканный стиль милитари от Temperley London [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://mylitta.ru/3664-military-luxury-2018-2019.html

6. Ергономіка і дизайн. Проектування сучасних видів одягу : навчальний посібник / М.В. Колосніченко, Л.І. Зубкова, К.Л. Пашкевич, Н.В. Остапенко та ін. – К. : ПП«НВЦ Профі», 2014. – 386 с.

7. Друкарство [Електронний ресурс]: Друк по текстилю. – Режим доступу : http://drukarstvo.com/druk-po-tekstylyu/

8. Лазарчук М.А. Розробка класифікації різновидів плоского оздоблення одягу та текстильних виробів / М.А. Лазарчук, М.О. Кулакова, Р.В. Хиневич // Тези доповідей XVII Всеукраїнської наукової конференції молодих учених та студентів [«Наукові розробки молоді на сучасному етапі»], (Київ, 27-28 квітня 2018 р.) / Мін-во освіти і науки України, КНУТД. – К. : КНУТД, 2018. – С. 119-120.

9. Есть такой бренд: Nymph Dresses [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://thedevochki.com/2017/07/13/est-takoj-brend-nymph-dresses/

10. Пін-ап / Вікіпедія [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D1%96%D0%BD-%D0%B0%D0%BF

11. Герой: Женщины-герои ВОВ в стиле пинап [Електронний ресурс]. − Режим доступу : http://myvklive.ru/geroy/zhenshtini-geroi-vov-v-stile-pinap

12. Дизайн: очерки теории системного проектирования / под. ред. Соловьевой Л. А. – Издательство Ленинградского университета, 1983 г. – 185 с.

13. Єременко І. І. Джерело натхнення в дизайні одягу: аспекти вивчення і використання в творчому процесі [Електронний ресурс] / І. І. Єременко // Вісник Харківської державної академії дизайну і мистецтв. Мистецтвознавство. Архітектура. – 2007. – № 9. – С. 41–48. – Режим доступу : http://nbuv.gov.ua/UJRN/had_2007_9_5

References

1. Mancevich A. Ju. Sovershenstvovanie metodov transformativnogo formooobrazovanija v dizajne kostjuma [Elektronnij resurs] : diss. … kand. tehn. nauk : special'nost' – 17.00.06 / A.Ju. Mancevich – M., 2013. – 268 s.

2. Na valovii: Zukhvalyi styl militari v zhinochomu odiazi [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : http://valova.te.ua/2014/12/zuhvalyj-styl-militari-v-zhinochomu-odyazi/

3. Kolosnichenko M.V. Moda i odiah. Osnovy proektuvannia ta vyrobnytstva odiahu / M.V. Kolosnichenko, K.L. Protsyk. – Kyiv : KNUTD, 2011. – 238 s.

4. YOU IN FASTION: Kolektsiia Christian Dior osin-zyma 2018-2019. Na zghadku pro studentski protesty 1968 roku v Paryzhi [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : https://youinfashion.com.ua/fashion/clothing-collections/kollekciya-christian-dior-osen-zima-2018-2019-v-pamyat-o-studencheskix-protestax-1968-goda-v-parizhe/

5. MYLITTA: Izyskannyj stil' militari ot Temperley London [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu : https://mylitta.ru/3664-military-luxury-2018-2019.html

6. Erhonomika i dyzain. Proektuvannia suchasnykh vydiv odiahu : navchalnyi posibnyk / M.V. Kolosnichenko, L.I. Zubkova, K.L. Pashkevych, N.V. Ostapenko ta in. – K. : PP«NVTs Profi», 2014. – 386 s.

7. Drukarstvo [Elektronnyi resurs]: Druk po tekstyliu. – Rezhym dostupu : http://drukarstvo.com/druk-po-tekstylyu/

8. Lazarchuk M.A. Rozrobka klasyfikatsii riznovydiv ploskoho ozdoblennia odiahu ta tekstylnykh vyrobiv / M.A. Lazarchuk, M.O. Kulakova, R.V. Khynevych // Tezy dopovidei KhVII Vseukrainskoi naukovoi konferentsii molodykh uchenykh ta studentiv [«Naukovi rozrobky molodi na suchasnomu etapi»], (Kyiv, 27-28 kvitnia 2018 r.) / Min-vo osvity i nauky Ukrainy, KNUTD. – K. : KNUTD, 2018. – S. 119-120.

9. Est' takoj brend: Nymph Dresses [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu : http://thedevochki.com/2017/07/13/est-takoj-brend-nymph-dresses/

10. Pin-ap / Vikipedija [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu : https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D1%96%D0%BD-%D0%B0%D0%BF

11. Geroj: Zhenshhiny-geroi VOV v stile pinap [Elektronnij resurs]. − Rezhim dostupu : http://myvklive.ru/geroy/zhenshtini-geroi-vov-v-stile-pinap

12. Dizajn: ocherki teorii sistemnogo proektirovanija / pod. red. Solov'evoj L. A. – Izdatel'stvo Leningradskogo universiteta, 1983 g. – 185 s.

13. Ieremenko I. I. Dzherelo natkhnennia v dyzaini odiahu: aspekty vyvchennia i vykorystannia v tvorchomu protsesi [Elektronnyi resurs] / I. I. Yeremenko // Visnyk Kharkivskoi derzhavnoi akademii dyzainu i mystetstv. Mystetstvoznavstvo. Arkhitektura. – 2007. – № 9. – S. 41–48. – Rezhym dostupu : http://nbuv.gov.ua/UJRN/had_2007_9_5

Рецензія/Peer review : 25.11.2018 р. Надрукована/Printed :15.2.2019 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Пашкевич К.Л.

DOI 10.31891/2307-5732-2019-269-1-77-81
УДК 685.34

А.І. БАБИЧ, В.П. КЕРНЕШ
Київський національний університет технологій та дизайну

РОЗРОБКА АСОРТИМЕНТУ ЖІНОЧОГО ВЗУТТЯ З УРАХУВАННЯМ СПОЖИВЧИХ ПЕРЕВАГ

В статті розглянуто стан ринку вітчизняного взуття та наведено результати маркетингових досліджень споживчих переваг для розробки асортименту жіночого взуття, а також з'ясовано, наскільки його асортимент задовольняє потреби населення. Прогнозовано можливість використання нестандартних текстильних матеріалів для виробництва взуття. Розроблено колекцію ескізів різних конструкцій взуття з використанням текстилю, що включає оцінку споживачів щодо актуальності використання текстилю під час виробництва взуття.

Ключові слова: *натуральна шкіра, текстильні матеріали, ринок взуття, маркетингові дослідження, споживчі переваги, попит, респонденти, сегментація, якість.*

A.I. BABYCH, V.P. KERNESH
National University of Technology and Design

DEVELOPMENT OF TEXTILE WOMEN'S SHOES ASSEMBLY WITH CONSUMPTION BENEFITS

The purpose of this work is to highlight and substantiate the results of marketing research, to determine the factors of importance of consumer preferences regarding design, materials, prices, quality of shoes, which may improve the range of manufacturers, forecasting the use of modern non-standard textile materials for the production of products of this segment, improving its quality and increase in demand for footwear of Ukrainian manufacturers. The method uses a questionnaire to predict the possibility of using non-typical textile materials in the production of shoes, the formation of the range of products of this segment and the assessment of consumers' opinions on certain criteria of weight in general. In the course of the study, a questionnaire was developed and 230 people aged 18 to 65 were polled. The results of the study are processed on a personal computer with an error of 4-5. The survey revealed a discrepancy between supply and demand assortment structure. As a result, there are significant volumes of unrealized demand - 20%. Such a large number of consumers who could not meet their demand is explained by the imperfect system of promotion of footwear in the market, the lack of a quick response to consumer inquiries and fashion. One of the important ways of solving this problem is to analyze consumer needs and increase the competitiveness of domestic shoes by forming an assortment of production, taking into account the factors of consumer choice. The article deals with the state of the domestic footwear market and presents the results of marketing researches of consumer preferences for the development of the range of women's footwear, as well as the extent to which its range satisfies the needs of the population. The possibility of using non-typical textile materials for the production of footwear is projected. A collection of sketches of various shoe designs with the use of non-typical textile materials was developed, including the assessment of consumers regarding the relevance of the use of textiles in the production of footwear.

Key words: genuine leather, textile materials, shoe market, marketing research, consumer preferences, demand, respondents, segmentation, quality.

Вступ

Аналіз вітчизняного ринку взуття і світовий досвід дозволяють констатувати той факт, що в країнах з 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.

Сучасні ринкові відносини вимагають постійного оновлення товарної пропозиції, тому насамперед актуальна проблема виробництва і випуску на ринок товарів оновленого асортименту з сучасних не стандартних матеріалів є актуальною.

У міру розвитку продуктивних сил на основі науково-технічного прогресу розробка і вихід нових товарів, а також модифікація і трансформація 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

Метою даної роботи є 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 стандартних текстильних матеріалів для виробництва виробів даного сегменту, поліпшення його якості і збільшення попиту на взуття українських виробників.

Взуття – це група товарів, яка представляє собою елемент костюму, а також завершує і підкреслює особливості образу людини в цілому. Торговий асортимент неминуче формується під впливом промислового, оскільки можливості виробника визначають склад пропозиції. Однак, в умовах ринкової економіки, безпосередній вплив на промисловий асортимент надає торгівля. Саме вона бере участь у засіданнях художньої ради і вносить пропозиції щодо оптимізації та вдосконалення асортименту, 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]. Існує два напрямки маркетингового дослідження – кабінетне і польове, які доповнюють один одного.

В даній роботі використано метод анкетування для прогнозування можливості використання текстильних матеріалів при виробництві взуття, формуванні асортименту виробів даного сегменту і оцінки думок споживачів за певними критеріями вагомості в цілому.

Анкетування – це один з основних видів опитування, який передбачає безпосереднє спілкування з респондентом.

Зміна конструкції і матеріалу істотно впливає на створення оптимального асортименту виробів. Особливо до частих змін моди властиві вироби для жінок та молоді, тому щорічне оновлення асортименту моделей має бути максимальним.

При розробці моделей виробів враховують функціональну виразність форми, стильову спрямованість, гармонійну цілісність композиційної структури і досконалість виробничого виконання.

На зовнішній вигляд впливають матеріал, форма, силует, конструкція, колір, розмір, якість застосовуваної фурнітури та оздоблення.

Естетичні властивості виробів обумовлюються також фактурою матеріалу, кольором 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 тощо.

Від правильного спроектованого виробу залежить зручність в процесі його експлуатації.

Істотно впливає на зовнішній вигляд фактура матеріалу і фурнітура, її відповідність призначенню виробу та напрямку моди.

Якісний виріб є атрибутом респектабельності людини. Сьогодні потенційному споживачеві пропонується такий великий спектр марок і моделей виробів, що легко розгубитися. Більшість всесвітньо відомих виробників мають свої представництва в інших країнах. І 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 міру насичення ринку продукцією зростають вимоги до асортименту і якості виробів, багато з яких тепер купуються не вперше, а на заміну старим.

Споживчі переваги і їх показники визначають ефективність використання виробів за призначенням, їх соціальну значимість, практичну корисність, зручність користування, нешкідливість і естетичну досконалість.

Номенклатура споживчих переваг і показників якості товарів повинна відповідати наступним вимогам:

- враховувати призначення та умови споживання даної групи товарів або конкретного товару;
- відображати сучасні досягнення науки і техніки, а також зміни в структурі попиту і потреб населення;
- сприяти обліку вимог споживачів з метою підвищення якості товарів, їх збуту і ефективності споживання.

Структура споживчих властивостей служить основою формування номенклатури споживчих переваг та показників якості виробу.

Методика проведення дослідження. Для проведення соціологічного дослідження необхідно знати про те, як формується вибірка. Вибірка даних являє собою сукупність отриманих відповідей усіх респондентів, які взяли участь у дослідженні. Варто відзначити, що будь-яка вибірка має дві характеристики - кількісну та якісну.

Якісна характеристика відображає значущі змінні, що характеризують респондентів. Наприклад, вік, стать, національність, професія - можуть якісно відображати вибірку.

Для того, щоб висновки, отримані за результатами вибірки, можна було вважати достовірними і поширювати на всіх схожих по значимим змінним людей (всі учні однієї школи, всі жінки країни), вибірка повинна відповідати вимогам репрезентативності. Тобто включати в себе найрізноманітніших представників досліджуваного нами суспільства [2].

Кількісна характеристика вибірки – це її обсяг, ті люди, які взяли участь у дослідженні. Мінімальне число респондентів, на підставі думок і даних яких можна робити наукові висновки – 25–30 осіб. Але, звичайно, для даної роботи цього не недостатньо. Кількість респондентів розраховується за формулою (1):

$$n \geq \frac{\delta^2 z_{\frac{\alpha}{2}}^2}{d^2}, \quad (1)$$

δ^2 – дисперсія сукупності;

$z_{\alpha/2}$ – точка стандартного нормального розподілу;

d – довірчий інтервал;

Частіше за все α= 0,05, тоді $z_{\alpha/2}$= $(1{,}96*\delta)^2/ d^2$. Нам необхідно, щоб з імовірністю 0,95 оцінка середнього знаходилась в інтервалі μ=±0,02. Відомо, що розмах вихідної величини складає 0,3, тоді δ=0,3/3=0,1. Виходячи з отриманих даних, ми можемо розрахувати оптимально необхідну кількість респондентів.

$$n \geq \frac{(1.96 \times 0{,}1)^2}{0{,}02^2} = 96. \quad (2)$$

Після розрахунків отримуємо необхідну кількість респондентів, вона дорівнює 96 чоловік.

Для проведення соціологічного дослідження, необхідно продумати методи отримання інформації, що підходить для вирішення поставленої задачі Це можуть бути експеримент, спостереження, метод інтерв'ю, анкетування.

Відмінною особливістю анкетування є можливість опитати велику кількість респондентів в найкоротші терміни, тому обрано саме анкетування. Корисним було звернути увагу і на статистичні дані. Це допомогло при формулюванні теми анкетування і складових її питань.

Метою опитування є вивчення переваг споживачів при виборі матеріалів, конструкцій виробів тощо.

Запитання були складені таким чином, щоб було зрозуміло всім опитуваним. Для легкості сприйняття ми не намагались використовувати без необхідності наукові терміни і уникали складних речень. Це полегшило завдання респонденту і знизило час заповнення анкети.

Послідовність розташування питань: важкі для сприйняття знаходилися в середині, а більш легкі – в кінці і на початку анкети.

В анкеті міститься інформація, яка складається зі скорочених питань щодо актуальності моделей виробів для жінок, конструкцій, форм, зовнішнього вигляду, матеріалів та пріоритетності покупки.

Основна частина

У ході дослідження була розроблена анкета і опитані фахівці торгівлі та споживачі (рис. 2), а саме жінки віком від 18 до 65 років. Результати дослідження оброблені на персональному комп'ютері з похибкою 4-5%. Анкетування респондентів було проведено в різних районах міста Києва. Всього було опитано 230 осіб, з них у Києві проживає 89%, 11% – в приміській зоні. Віковий розподіл респондентів представлений на рис. 1а.

За отриманими даними, найбільша група споживачів, це жінки віком від 18 до 55 років, що складають в сукупності 89 % покупців.

Середній загальний дохід на одного члена сім'ї становить 4000 грн. Жінки з вищою освітою склали 27%, 17% – мали не закінчену вищу, 30% – середньо-спеціальну освіту та 26% – середню освіту.
Серед опитаних були споживачі різного роду занять: офісні працівники (30%), викладачі (16%), студенти (24%), робочі спеціалісти (15%), домогосподарки (11%), безробітні (4%) (рис. 1б).

Протягом останніх років можна спостерігати тенденцію зміни цінностей і способу життя споживачів: збільшення прихильності людей до купівлі взуття в магазинах, а не на ринках і лотках, тобто в хороших умовах (наявність примірювальних кабін, продавців-консультантів тощо).

Торгівельні центри 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.

Українці все частіше купують товари народного вжитку в Інтернет-магазинах (частка таких покупок досягає 15%). Інтернет-торгівля в Україні стає головним конкурентом звичайних магазинів. Часто покупці бронюють взуття в інтернет-магазинах з подальшою приміркою і купівлею в приміщенні. На питання анкети «Де ви переважно купуєте взуття?» отримано наступні відповіді від респондентів (рис. 1в).

Найчастіше в мережі Інтернет купують споживачі вікової групи 24–39 років, вони ж і група 18–23 роки, найбільше купують в торгових центрах, старші ж жінки частіше купують на ринках і магазинах.

Для більшості опитуваних не має значення вітчизняний товар чи імпортний , лише 20% налаштовані на покупку імпортного, а 11% – лише українського виробництва. Багато з опитуваних зазначали, що з задоволенням би купували українське, зважаючи на ціну і якість, однак товар не представлений в місцях, де вони зазвичай купують. Також опитувані нарікали на відсутність українського взуття в торгівельних місцях Києва.

Назвали хоч однин бренд українського взуття – 47% опитуваних, найчастіше респонденти називали марку Міда запорізької взуттєвої фабрики, далі йдуть марки Inblu, Romani, також споживачі називали такі бренди українського взуття: Bistfor, Прайм Шуз, Kasandra, DiMax, Modus Vivendi, Grand Style, Las Espadrillas, Roma Style, ЛеоМода. Незважаючи на те, що опитування стосувалось лише жіночого взуття, деякі жінки називали українські марки, що випускають взуття лише для чоловіків, такі як M-Tac, Бастіон**,** Piligrim. 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%), результати представлені на рис. 1г

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%), 27 % – в кінці сезону, коли надаються значні знижки, для 8% – немає значення коли. Зазвичай для купівлі 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. 1д.)

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, технологія виготовлення та зовнішній вигляд (стиль, колір, фасон), бренд виробника.

Окрім того, респондентки вказали, що звертають велику увагу на зручність взуття, його надійність і довговічність.

Згідно з рис. 1е, 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 30% опитуваних респондентів, із синтетичних матеріалів – 20%, із штучних матеріалів – 10% відповідно до рис. 1є. Однак практично 50% опитуваних зазначили, що хотіли б мати в своєму гардеробі цільне текстильне взуття або взуття з елементами текстилю.

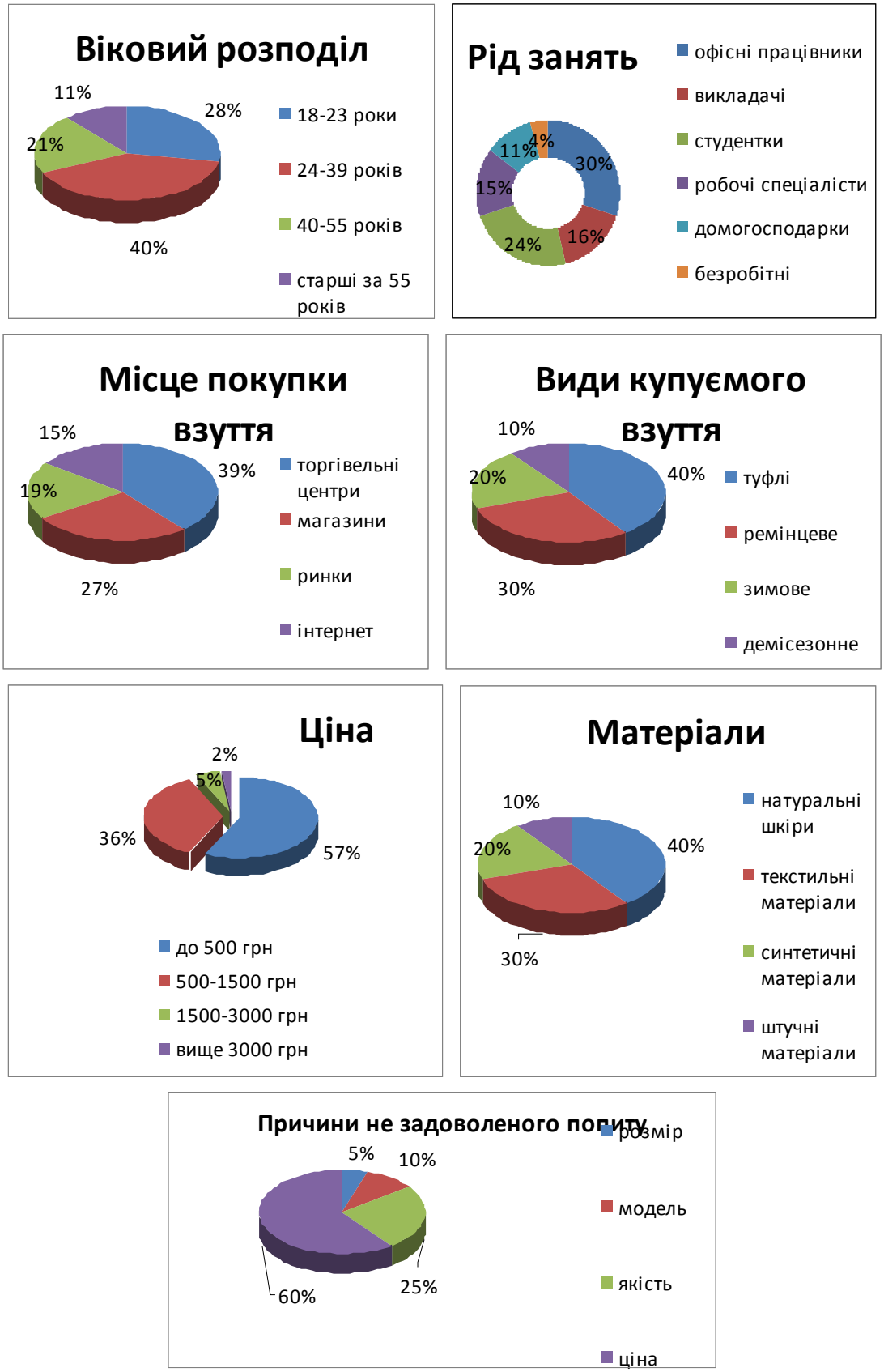


Рис. 1. Результати опитування респондентів під час вибору взуття за критеріями споживчого вибору (елементи анкетування (а-ж))

В ході опитування виявлена невідповідність асортиментної структури пропозиції та попиту. У результаті цього спостерігаються значні обсяги нереалізованого попиту – 20%, тобто платоспроможні споживачі, які мали намір купити взуття, не знайшли відповідної пропозиції. Частка ж вимушених (тобто таких, що не зовсім задовольнили покупців) покупок становить 18%.

За результатами проведених досліджень були виявлені причини незадоволеного попиту, що зазначені на рис. 1ж., а саме: 25% респондентів назвали головною причиною незадоволеного попиту якість взуття, 60% – високу ціну, 5% – відсутність потрібного розміру чи так звані маломірки, 10% – незадоволення фасоном і моделями взуття.

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 із важливих шляхів вирішення цієї проблеми є аналіз потреб споживачів і підвищення конкурентоспроможності вітчизняного взуття шляхом формування асортименту на виробництві враховуючи фактори споживчого вибору.

З врахуванням найбільш вагомих критеріїв розроблено ескізний ряд моделей взуття для жінок з елементами текстилю (рис. 2), що забезпечить легкість та вишуканість конструкції, багатофункціональність, можливість максимальної експлуатації та зручності, а також дозволяє знизити собівартість виробу, що в умовах сьогодення є важливим фактором для пересічного українця.

Рис. 2. Модельний ряд жіночого взуття з елементами текстилю

Висновки

Визначено, що сьогоднішня ситуація на ринку взуття розвивається відповідно до принципів теорії попиту. Наразі в країні склалась доволі сприятлива ситуація для нарощування виробництва. Останні декілька років суттєво змінилися фактори, за якими український споживач вирішує купувати нову пару взуття. Однак в пріоритеті залишаються ціна і якість. Перспективами подальших досліджень у цьому напрямі є визначення фізико-механічних параметрів не типових для виробництва взуття текстильних матеріалів, розробка конструкторської документації на виріб, виготовлення зразків, їх апробація та надання пропозицій підприємствам з виробництва жіночого взуття щодо використання сучасних текстильних матеріалів, розширення асортименту й удосконалення якості виробів, згідно попиту і побажань 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. Borodinya O. About the shoe market of Ukraine / O. Borodin // Light industry. – 2012. – No. 3. – P. 21–22.

2. Harkavenko S.C. Marketing. Textbook. – Kyiv : Libra, 2002. – 705 p.

3. Dolzhenko M.V. Investigation of physical and mechanical characteristics of leather materials in the process of manufacturing and exploiting shoes / Dolzhenko M.V., Garkavenko S.S., Babich A.I. // Bulletin of the Kiev National University of Technology and Design. – 2017. – № 2. – P. 12–20.

4. Site of the State Committee of Statistics of Ukraine. URL: http://www.ukrstat.gov.ua

5. Stopa i ratsionalnaya obuv. URL: 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 Khmelnytsky National University. – 2012. – № 5. – S. 125–128.

7. Kouplend G. Vse o zdorove vashih nog. Otmladenchestva do starosti / Glenn Kouplend, S. Solomon. – M. : AST, 2008. – 224 s.

Рецензія/Peer review : 27.11.2018 р. Надрукована/Printed :15.2.2019 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Чупринка В.І.

DOI 10.31891/2307-5732-2019-269-1-82-90
УДК 662.7

А.Я. ГАНЗЮК, Д.М. ВИШНЕВСЬКА, Н.Л. ПОХИЛО
Хмельницький національний університет
О.П. ШЕЛЕСТЮК, О.М. МІЩУК
Хмельницький науково-дослідний експертно-криміналістичний центр МВС України

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ОЧИЩЕННЯ НАФТОПРОДУКТІВ ЗА ДОПОМОГОЮ АКТИВОВАНИХ СМЕКТИТОВИХ ГЛИН

З метою зменшення негативного впливу на навколишнє середовище та збереження водних ресурсів розроблена технологія одержання і використання нових ефективних сорбентів на основі природних алюмосилікатів. В роботі досліджено можливість використання модифікованих сапонітових глин у якості ефективних сорбційних матеріалів в процесах очищення нафтопродуктів. Проаналізовано їх детальний вуглеводневий склад та оцінено основні показники бензинів до та після очищення. Отримані активовані форми на основі сапонітових глин можна використовувати в якості наповнювачів полімерних середовищ і пластифікаторів, а також у виробництві нафтових сорбентів.

***Ключові слова**: адсорбція, нафтопродукти, хроматографія, октанове число, сапоніт, тиск насиченої пари.*

A.Y. GANZYUK, D.M. VISHNEVSKAYA, N.L. POHIULO
Khmelnytskyi National University
O.P. SHELESTIYK, O.M. MISHCHUK
Khmelnyskyi Research-Science Forensic Centre of Ministry of Internal Affairs of Ukraine

STUDY OF PROCESSES OF CLEANING OF OIL PRODUCTS ACCORDING TO ASSISTED SMECTITE CLAYS

The possibility of modified saponite clays using as efficient sorption materials in the purification processes of petroleum products. The detailed hydrocarbon analysis of treated gasoline were made. The main characteristics of gasolines treated by modified saponite sorbents was estimated by chromatography methods. The possibility of modified saponite clays using as efficient sorption materials in the purification processes of petroleum products. The detailed hydrocarbon analysis of treated gasoline were made. The main characteristics of gasolines treated by modified saponite sorbents was estimated by chromatography methods. The saponite application in the forensic research to detect trace amounts of combustible liquids as material evidence from the place of fire were confirmed. We used natural mineral sorbents of different degrees of dispersion, their activated and modified forms for cleaning of gasoline with octane number 92 resulting in increase in octane number of gasoline up to 95 and more which was determined by research and motor methods. Treatment of gasoline by sorbent was carried out for 5 min. using ultrasound system then sorbent was separated by centrifugation and settled as sediment. Sorption capacity of hydrophobic sorbents for petroleum products is from 14.4 to 16.6 g/g, sorption capacity for dissolved and emulsified petroleum is from 292 to 315 mg/g. Refined gasoline was investigated using gas chromatography with high degree of resolution. Changes in the structure of clay have been analysed with infrared spectroscopy. As a conclusion, the obtaining of mineral sorption materials on the basis of saponite clay enables to use them as fillers of polymer environment and fluidizing agents, as well as in production of oil sorbents.

***Keywords**: adsorption, petroleum products, chromatography, octane rating, saponite, vapour pressure.*

В автомобілебудуванні склалася тенденція створення автомобілів з потужним двигуном, який працюватиме при високому ступені стискання. Для таких двигунів необхідний якісний бензин. До останнього часу підвищення якості (октанового числа) бензинів здійснювалася за допомогою добавки етильованої рідини з вмістом тетраетил свинцю. При спалюванні палива, ця рідина розкладається і пари свинцю виділяються в атмосферу з вихлопними газами, що підвищує їх токсичність. Перспективний шлях отримання палив високої якості і з пониженою токсичністю полягає у видаленні низько октанових парафінових вуглеводнів на сапонітових глинах, а тому проведення наукового дослідження є безумовно актуальним.

Світові запаси нафти складають понад 132,7 млрд т, з них 74 % припадає на Азію, у тому числі Близький Схід (більше 66 %). Найбільшими запасами нафти володіють (у порядку зменшення): Саудівська Аравія, Росія, Ірак, ОАЕ, Кувейт, Іран, Венесуела, Мексика, Лівія, Китай, США, Нігерія, Азербайджан, Казахстан, Туркменія, Норвегія. Обсяг світового видобутку нафти становить близько 3,1 млрд т, тобто майже 8,5 млн т на добу. Видобуток ведеться 95 країнами, причому більше 77 % продукції сирої нафти видобувають 15 з них, включаючи Саудівську Аравію (12,8 %), США (10,4 %), Росію (9,7 %), Іран (5,8 %), Мексику (4,8 %), Китай (4,7 %), Норвегію (4,4 %), Венесуелу (4,3 %), Великобританію (4,1 %), Об'єднані Арабські Емірати (3,4 %), Кувейт (3,3 %), Нігерію (3,2 %), Канаду (2,8 %), Індонезію (2,4 %), Ірак (1,0 %) (рис. 1) [1–4].

В Україні територія видобутку нафти розподіляється на регіони: Західний, Східний, Південний, кожен з яких має свої особливості та потужності виробництва [4, 5]. Сучасний автомобільний бензин є сумішшю компонентів, які одержані в результаті різних технологічних процесів переробки нафти. Залежно від марки автомобільний бензин готують на основі бензинів прямої перегонки, каталізного крекінгу та реформінгу з участю у якості компонентів бензину термічного крекінгу, толуолу, алкіл бензину, а також ароматизованого компоненту, який є сумішшю ароматичних вуглеводнів, які одержані при піролізі нафтопродуктів. В товарні автомобільні бензини додають легкі компоненти, які утворюються при переробці вуглеводневих газів, а саме: бутан, бутан-бутиленова та пента-аміленова фракції. Для покращення

властивостей та збільшення ресурсів в склад автомобільних бензинів додають сполуки, що містять кисень, а саме метиловий та вторинний бутиловий спирти та естери. Компонентний склад низькооктанових автомобільних бензинів достатньо різноманітний та залежить від наявності технологічного обладнання кожного підприємства. Для високооктанових автомобільних бензинів ця величина є постійною; вуглеводневий склад залежить від технологічного процесу та якості нафти, яка переробляється [6, 7].

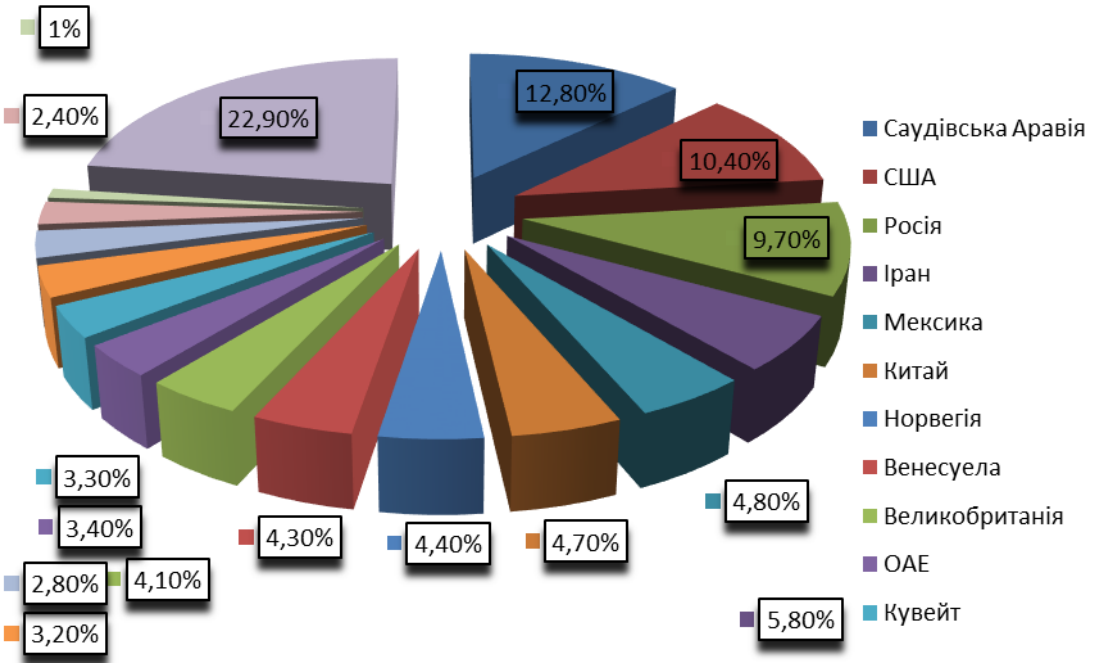


Рис. 1. Обсяг світового видобутку нафти

Адсорбція являється універсальним методом, що дозволяє практично повністю видалити домішки з газового чи рідкого середовища. В сучасній нафтопереробній промисловості адсорбційний метод широко використовують для поглиблення очищення технологічних потоків, покращення якості сировини та продуктів. В техніці широко використовуються різноманітні адсорбенти з розвитою внутрішньою поверхнею: силікагелі, алюмогелі, активоване вугілля, оксиди алюмінію, глини, глинозем, полімерні адсорбенти, пористе скло, цеоліти та інші [7]. Однорідна кристалічна структура природних мінеральних сорбентів, таких як сапоніти, наявність вільних пор визначеного розміру дають можливість використання їх для розділення речовин на основі різниці в розмірах і форм молекул. Особливе значення нові адсорбенти надали для сумішей, компоненти яких близькі по фізико-хімічним константам, тобто коли звичайні методи не можуть забезпечити необхідну ступінь розділення [7]. Глинистий мінерал, який використовується в даній роботі є ≤ 1 мм фракція сапоніту Ташківського родовища (Хмельницька область, Україна). Активований кислотою сапоніт отримували шляхом обробки п'яти грамів глини при механічному перемішуванні з 150 мл 2М розчинну H_2SO_4 при 90˚С. Через 4 години тверду фазу відокремлювали від розчину і від іонів SO_4^{2-} та просушували при кімнатній температурі. Вуглеводневу суміш марки А-92 очищували за допомогою смектитових глин різного ступеня дисперсності та методи активації [8–11].

Таким чином, у пробах бензинів, що були очищені кислотно-активованим, лужно-активованим та подрібненим до 30 мкм сапонітом октанове число збільшується зі зменшенням вмісту ароматичних вуглеводнів, на відміну від зразків, що були очищені термічно активованим та подрібненим до 7 мкм сапонітом, де значення октанового числа практично не змінилося.

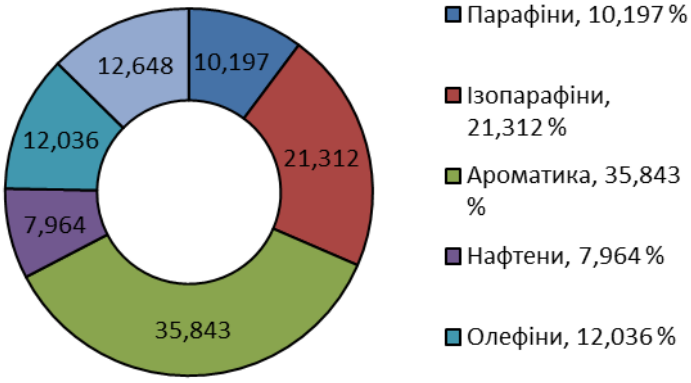


Рис. 2. Ваговий вміст (у %) вуглеводнів у контрольній пробі бензину А-92

Від фракційного складу карбюраторних палив залежать умови запуску, тривалість прогріву, перехід з одного режиму на інший та рівномірність розподілу робочої суміші за циліндрами двигуна (повнота згоряння палива). На рис. 2–7 наведено детальний вуглеводневий склад (у %) зразків бензинів, що досліджені хроматографічно у лабораторії досліджень мінералів Хмельницького національного університету.

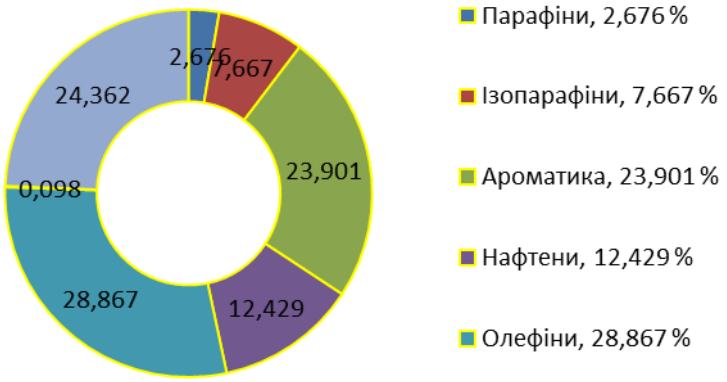


Рис. 3. Ваговий вміст (у %) вуглеводнів у пробі бензину, очищеного Кислотно-активованим сапонітом

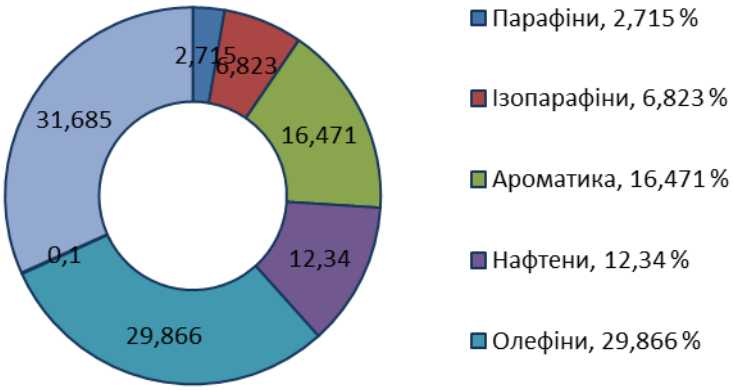


Рис. 4. Ваговий вміст (у %) вуглеводнів у пробі бензину, очищеного Лужно-активованим сапонітом

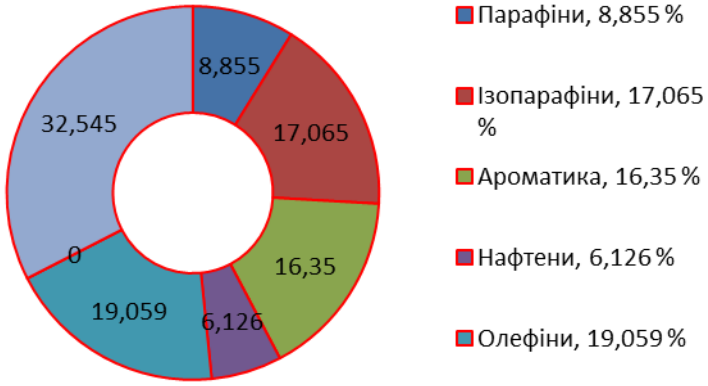


Рис. 5. Ваговий вміст (у %) вуглеводнів у пробі бензину, очищеного подрібненим до 7 мкм сапонітом

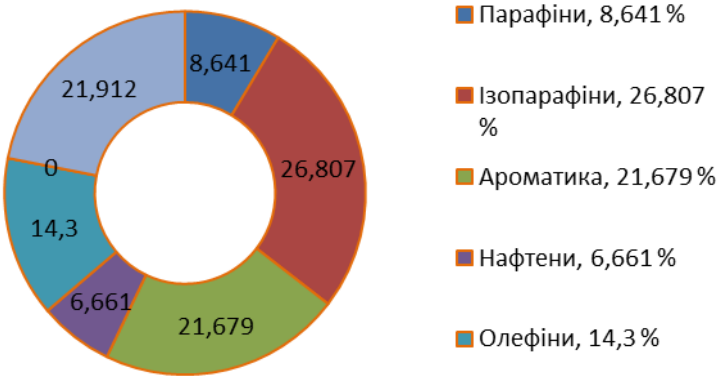


Рис. 6. Ваговий вміст (у %) вуглеводнів у пробі бензину, очищеного термічно активованим сапонітом

Мольний вміст парафінів та ізопарафінів для бензинів, очищених кислотно- та лужно-активованим сапонітами, зменшується в порівнянні з контрольною пробою в 3 рази, ароматичних фракцій в 2 – 2,5 рази. Зате мольний вміст нафтенових та олефінових зростає в 2 рази.

Важливими показниками є середнє значення молекулярної маси та відносної густини досліджуваних нафтопродуктів (таблиця 1).

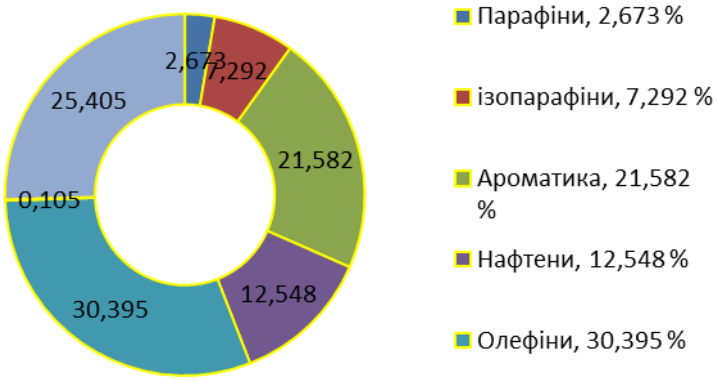


Рис. 7. Ваговий вміст (у %) вуглеводнів у пробі бензину, очищеного подрібненим до 30 мкм сапонітом

Таблиця 1

Середні показники молекулярної маси та відносної густини контрольної проби та бензину, очищеного сапонітами різних форм активації та ступеня дисперсності

Проба бензину та метод очищення	Молекулярна маса, г/моль	Відносна густина
Контрольна проба А-92	95,199	0,744
Кислотно-активованим	96,502	0,735
Лужно-активованим	93,611	0,722
Термічно активованим	95,341	0,715
Подрібнений до 30 мкм	94,529	0,729
Подрібнений до 7 мкм	94,658	0,713

Оцінку показників октанових чисел за дослідницьким та моторним методами проводили відповідно до ГОСТ 2177-99 «Нефтепродукты. Методы определения фракционного состава», ГОСТ 8226-82 «Топливо для двигателей. Исследовательский метод определения октанового числа», ГОСТ 29040-91 «Бензины. Метод определения бензола и суммарного содержания ароматических углеводородов» в лабораторії досліджень мінералів з використанням газової хроматографії високого ступеня роздільності, де у якості газу-носія використовували азот. Для експерименту було обрано зразки глинистих матеріалів різного ступеня дисперсності, активованих кислотою та лугом, термічно активованих. Для роботи на 1 мл бензину марки А-92 (Укрнафта) доцільно брати наважку сапоніту масою 0,25 г; за допомогою ультразвуку в системі відбувалось перемішування на протязі 5 хв. Наступним етапом було центрифугування, завдяки чому сорбент осідав у вигляді осаду. Очищений бензин хроматографували і за допомогою програми «GAZOLIN» обробляли результати, які наведені в таблиці 2 та на рисунку 8.

Таблиця 2

Показники октанового числа та вмісту ароматичних фракцій бензину А-92

Зразок природного мінерального сорбенту та вид модифікації	Октанове число за дослідницьким методом	Октанове число за моторним методом	Вміст ароматичних фракцій, %
Контрольна проба бензину (А-92)	91,542	84,435	35,843
Активований H_2SO_4 (25%)	96,497	85,678	23,901
Активований лугом	95,719	84,886	16,471
Термоактивований	90,718	80,310	21,679
Подрібнений (7 мкм)	90,617	82,077	16,354
Подрібнений (30 мкм)	96,609	85,761	21,582

Згідно з ДСТУ, наведеного вище, контрольна проба бензину (А-92) має значення 91,542 (за дослідницьким методом), а вміст ароматичних вуглеводнів не повинен перевищувати 35 %, а в контрольній пробі його 35,843 %.

Після обробки бензину кислотно-активованим сорбційним матеріалом, октанове число за моторним методом зростає на 1,5 одиниць, а за дослідницьким – на 5 одиниць. При цьому вміст ароматичних фракцій зменшується від 35,843 % до 23,901 %. Зростання октанових чисел спостерігалось і для бензину, очищеного за допомогою лужно-активованого сапоніту.

Паралельно проведено дослідження у випробувальному центрі паливно-мастильних матеріалів м. Київ (ВЦ ПММ) та в Інституті біоорганічної хімії та нафтохімії при Національній академії наук України (ІБХН НАНУ). Для випробування у ВЦ ПММ було взято наступні зразки: контрольна проба бензину А-92 компанії Укрнафта, та її зразки, очищені кислотно-активованим сапонітом та подрібненим до 7 мкм. Результати дослідження у ВЦ ПММ наведено в таблиці 3 та на рисунку 9.

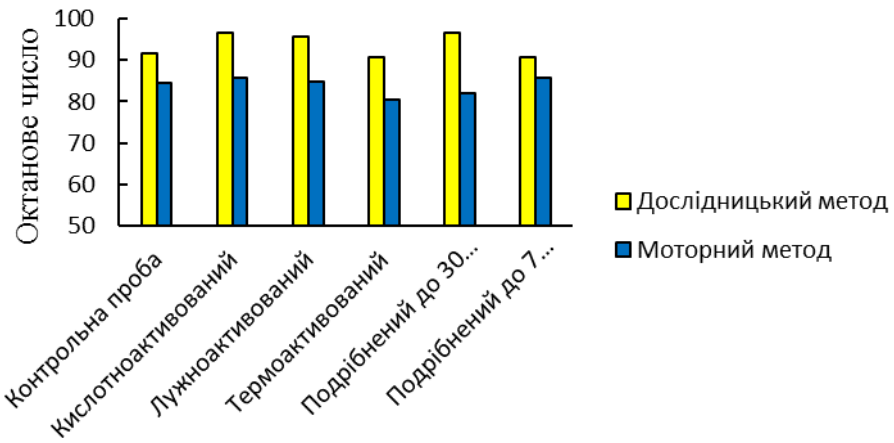


Рис. 8. Показники октанових чисел за дослідницьким та моторним методами бензину А-92, очищеного сапонітами різних форм активації

Таблиця 3

Результати випробувань у ВЦ ПММ

Найменування показників	Контрольна проба А-92	Кислотно-активований	Подрібнений до 7 мкм
Октанове число за моторним методом	81,5	83,5	83,5
Октанове число за дослідницьким методом	91,0	94,0	94,0
Тиск насичених парів, кПа	53,7	54,4	54,8
Сумарний вміст ароматичних вуглеводнів, %	38,0	39,1	38,3

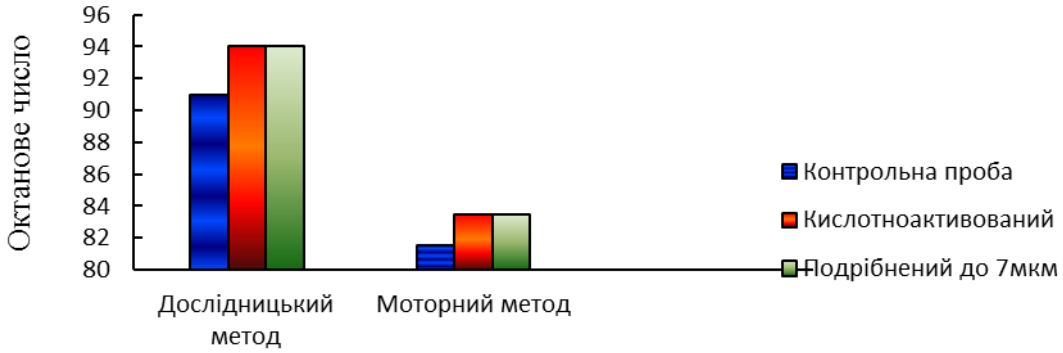


Рис. 9. Показники октанових чисел бензину А-92 за моторним та дослідницьким методами, визначені у Випробувальному центрі паливно-мастильних матеріалів

Результати експериментальних досліджень, проведених за сприяння Випробувального центру паливно-мастильних матеріалів, дали змогу зробити висновки, що показники октанових чисел бензинів, очищених за допомогою активованих сапонітових глин зростають до трьох одиниць, як за дослідницьким, так і за моторним методами.

Для роботи у ІБХН НАНУ було взято зразки бензинів, очищених активованими та модифікованими природними мінеральними сорбентами (лужно-, кислотно- та термоактивовані та подрібнені до 30 мкм). Результати досліджень у ІБХН НАНУ наведено в таблиці 4 та на рисунку 10.

Таблиця 4

Результати досліджень показників октанових чисел за дослідницьким та моторним методами у Інституті біоорганічної хімії та нафтохімії

Зразки природних мінеральних сорбційних матеріалів	Октанове число за дослідницьким методом	Октанове число за моторним методом
Природний (подрібнений до 30 мкм)	93,9	82,0
Кислотно-активований	93,9	81,9
Активований лугом	94,3	82,5
Термічно активований	94,0	82,0
Контрольна проба	92,0	80,0

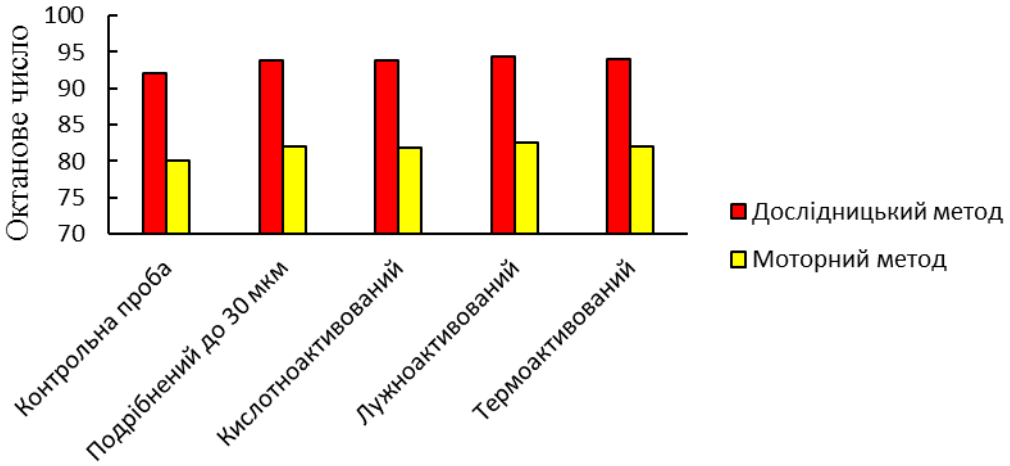


Рис. 10. Результати досліджень показників октанових чисел бензинів, очищених активованими та модифікованими сапонітовими глинами за дослідницьким та моторним методами у ІБХН НАНУ

Оцінка показників октанових чисел бензинів, визначених у Інституті біоорганічної хімії та нафтохімії Національної академії наук України, показала, що октанові числа за дослідницьким методом зростають до трьох одиниць, а за моторним методом до двох. Дані дослідження корелюють між собою, що вказує на доцільність використання сапонітових глин у якості ефективних сорбентів для очищення вуглеводневих сумішей. Як було вказано вище, сучасний бензин складається з великої кількості класів різноманітних вуглеводнів, головними серед яких є ароматичні, нафтенові, парафінові та олефінові, ваговий вміст яких відрізняється в залежності від ступеня очищення бензину, що в свою чергу впливає на формування значення октанового числа, антидетонаційної стійкості та чутливості палива. Таким чином, при очищенні бензинів кислотно- та лужно-активованим сапонітом вміст низькооктанові фракції парафінів та ізопарафінів в порівнянні з контрольною пробою зменшується в 5 разів, можливо, за рахунок цього відбувається зростання октанового числа на три одиниці.

Визначення тиску насиченої пари проводили відповідно до ГОСТ 1756-52 «Нефтепродукты. Методы определения давления насыщенных паров» [12–14] за допомогою газового хроматографа «Кристал – 2000М». Наважку сапоніту відповідного виду масою 0,25 г, заливали 1 мл досліджуваного бензину. В системі проходило перемішування і центрифугування, при якому сапоніт осідав у вигляді осаду. Очищений бензин піддавали хроматографуванню і за допомогою програми «GAZOLIN» обробляли результати, які подані у таблиці 5.

Таблиця 5

Показники тиску насиченої пари досліджуваних вуглеводневих сумішей

Зразок сорбційного матеріалу та метод активації	Тиск насиченої пари, кПа
Контрольна проба бензину (А-92)	52,006
Активований H_2SO_4 (25%)	79,046
Активований лугом	80,626
Термічно активований	63,246
Подрібнений (7 мкм)	56, 882
Подрібнений (30 мкм)	82,520

Констатовано зростання тиску насиченої пари для всіх зразків досліджуваного палива, при чому найбільше зростання цього показника до 20 % характерне для нафтопродукту, очищеного кислотно- та лужно-активованим сапонітом. Незначне зростання до 1 % (це можна врахувати, як похибку досліджень) спостерігається для зразків бензину, очищеного сапонітовими глинами подрібненими до 7 мкм.

Активні сірчисті сполуки (сірководень, меркаптани) викликають сильну корозію паливної системи та транспортуючих ємностей, а тому бензин повинен бути повністю очищений від цих речовин. Повнота очищення контролюється аналізом на мідній пластинці. Неактивні сірчисті сполуки (тіофени, сульфіди, дисульфіди) корозію не викликають, але при згорянні цих сполук утворюються оксиди сульфуру (SO_2, SO_3), під дією яких відбувається швидка корозія деталей двигуна, падає його потужність та економічність. В автомобільних бензинах в залежності від марки допускається вміст сірки у кількості від 0,1 % до 0,15 %, тобто, вміст сірки в авіаційних та автомобільних бензинах строго регламентується. Визначення вмісту цього елемента в нафтопродуктах проводилося відповідно до ГОСТ 19121-91 «Нефтепродукты. Метод определения содержания серы сжиганием в лампе». Для дослідження використано зразки бензину, які були попередньо очищені природними мінеральними сорбційними матеріалами на основі сапоніту Ташківського родовища різної активації та ступеня дисперсності. Результати по визначенню вмісту сірки у нафтопродуктах представлено у таблиці 6 та на рисунку 11.

Таблиця 6

Вміст сірки у досліджуваних вуглеводневих сумішах

Природний сорбційний матеріал та його активовані форми	Вміст сірки, %
Природний подрібнений до 30 мкм	0,0019
Кислотно-активований	0,0015
Лужно-активований	0,0014
Термоактивований	0,0020
Контрольна проба (бензин А-92)	0,0020

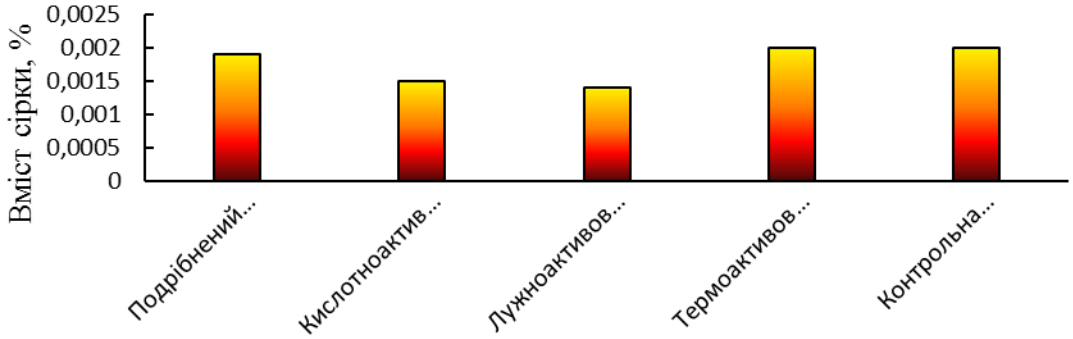


Рис. 11. Результати визначення вмісту сірки в нафтопродуктах

Таким чином, контрольна проба бензину містила 0,0020 % сірки у своєму складі, а зразки, що були попередньо очищені сапонітами, вміст цього елемента зменшили до 0,0014 %.

Відповідно до методики виконання якісного визначення вмісту тетраетил свинцю для дослідження обрано декілька видів бензинів, як очищені сапонітами – кислотно-активованими, лужно-активованими, термічно активованими і природними різного ступеня дисперсності. Масу активованої глини 1 г заливали 5 мл вихідного зразка бензину А-92 компанії Укрнафта. Витримували протягом 15 хв, після чого фільтрували та відцентрифуговували. Відповідно до ГОСТ 28828-90 вміст тетраетил свинцю в бензинах має бути не більше 5,0 мг/дм^3. Але постановою кабінету міністрів України від 1 жовтня 1999 року № 1825 м. Київ «Про затвердження Програми поетапного припинення використання етильованого бензину в Україні» підготовлено виконання Загальноєвропейської стратегії поступового припинення використання етильованого бензину та Протоколу про важкі метали до Конвенції 1979 року про транскордонне забруднення повітря на великі відстані, прийнятих у червні 1998 року у м. Орхус (Данія) на Четвертій Конференції міністрів «Навколишнє середовище для Європи».

Поетапне припинення використання етильованого бензину є важливим заходом поліпшення стану навколишнього природного середовища і здоров'я населення України та Європи. При дослідженнях за методикою було виявлено, що на папері на який наносили вихідний зразок (бензин А-92 компанії «Укрнафта») не випав чорний осад свинцю, що свідчить про відсутність добавки тетраетил свинцю в бензині. Так як навіть слідів тетраетил свинцю не було виявлено, а тому подальші дослідження цього компоненту на очищених сапонітами бензинів не проводились. Отже, відсутність чорного осаду свинцю при дослідженнях дали можливість зробити висновок, що виробники дотримуються вимог щодо одержання бензину А-92 без вмісту етильованих добавок.

Для визначення нафтоємності у колбу наливали 40 мл бензину і вносили наважку сапоніту 0,4 г різної активації та ступеня дисперсності. Сорбція проходила протягом 5, 10, 30, 60, 120 хв. Потім сорбент зважували і оцінювали цей показник як відношення маси поглинутого нафтопродукту до маси сорбенту. Результати визначення нафтоємності представлено у таблиці 7.

Таблиця 7

Нафтоємність сорбційних матеріалів на основі сапоніту

Сорбційний матеріал та метод активації	Нафтоємність по бензину (г/г), хв				
	5	10	30	60	120
Активований H_2SO_4 (25%)	0,0060	0,0300	0,0345	0,03075	0,03025
Активований лугом	0,0060	0,0280	0,0340	0,0310	0,0300
Термічно активований	0,0008	0,0100	0,0110	0,0110	0,0110
Подрібнений (7 мкм)	Не визначено	Не визначено	Не визначено	Не визначено	Не визначено
Подрібнений (30 мкм)	0,0055	0,025	0,02845	0,02714	0,02700

Залежність маси поглинутого бензину від часу сорбції наведено на прикладі визначення нафтоємності бензину, очищеного кислотно-активованим сапонітом (рис. 12).

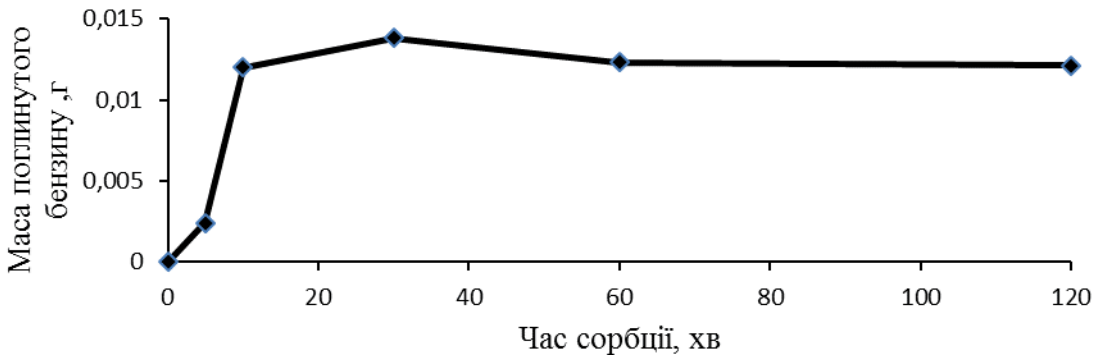


Рис. 12. Залежність маси поглинутого бензину від часу сорбції

Таким чином, найкращі результати по нафтоємності отримали сапоніти, активовані кислотою та лугом, а зразок з термічно активованим сапонітом має дуже низькі показники. Дослідження зразку бензину, очищеного подрібненим сапонітом (7 мкм) взагалі не можна було провести, так як сорбент володіє дуже великою плавучістю, що не дало змоги визначити вище вказаний показник. При чому, як видно з рис. 12, процес сорбції найкраще проходить в перші 30 хв, потім починає спадати і сорбент своїми порами перестає поглинати нафтопродукт.

Для визначення водопоглинання наважку сапоніту масою 1 г, заливали 50 мл води. Сорбція відбувалася протягом 30, 60, 120, 240 хв, потім суспензію відфільтровували і зважували. По різниці мас до і після поглинання води визначали вище вказаний показник, результати якого наведено в таблиці 8.

Таблиця 8

Водопоглинання сорбційних матеріалів на основі сапонітової глини

Зразок природного мінералу	Час сорбції, хв/маса сапоніту, г							
	30		60		120		240	
	до	після	до	після	до	після	до	після
Активований H_2SO_4 (25%)	1,0	1,8922	1,0	1,6837	1,0	1,5452	1,0	1,5236
Активований лугом	1,0	1,8299	1,0	1,6642	1,0	1,5011	1,0	1,4956
Термічно активований	1,0	1,2822	1,0	1,2750	1,0	1,2510	1,0	1,2300
Подрібнений (7 мкм)	Не визначено	Не визначено	Не визначено	Не визначено	Не визначено	Не визначено	Не визначено	Не визначено
Подрібнений (30 мкм)	1,0	1,8846	1,0	1,7570	1,0	1,7040	1,0	1,6230

Таким чином, кращими водопоглинаючими властивостями володіють кислотно-активований та лужно-активований сапоніти на відміну від термічно активованого. Така ж тенденція, як і в ході визначення нафтоємності, характерна для зразка подрібненого (7 мкм) сапоніту.

Висновки

Унікальність природних глинистих мінералів полягає не лише у високій ефективності та селективності сорбційних процесів, а й у широких можливостях проведення хімічного та структурного модифікування з метою зміни їх властивостей з необхідними заданими параметрами.

Таким чином, економічна доцільність використання сапонітів в різних технологічних процесах зумовлена існуванням ефективних методів регулювання їхньої геометричної структури та хімічної природи поверхні, наявністю в Україні великих родовищ (промислові запаси сапоніту оцінюються приблизно в 40 млн тонн) і невисокою вартістю глинистих мінералів. Завдяки пористій структурі та високорозвиненій поверхні такі мінеральні сорбенти можуть вилучати з водних розчинів різні речовини, а їхня екологічна безпечність робить можливим використання цих реагентів для потреб різних галузей промисловості. Це дозволить скоротити втрати бензину, поліпшити пожежну безпеку та екологічну обстановку.

Література

1. Класифікація видів палива [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://ukrmap.su/uk-g8/869.html (Дата звернення 05.10.2013)

2. Чукаєва І.О. Формування українського ринку нафти і нафтопродуктів / І.О. Чукаєва // Економіка України. – 2001. – № 2. – С. 84–86.

3. Експлуатаційні характеристики дизельного пального [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://ben4in.blogspot.com/p/blog-page_6269.html.

4. Смидович Е.В. Технология переработки нефти / Е.В. Смидович. – М. :Химия, 1980. – Ч. 2. – 328 с.

5. Дубинин М.М. Адсорбция и пористость / М.М. Дубинин. – М. : ВАХЗ, 1972. – 127 с.

6. Thomas W.J. Adsorption technology and design / W.J. Thomas, B. Crittenden. – Oxford : Butterworth Heinemann, 1998. – P. 8–30.

7. Кефер Р.Г. Адсорбенты, их получение, свойства и применения / Р.Г.Кефер, Н.Ф. Данилов. В.З. Пойлов. – Л. : Наука, 1978. – 204 с.

8. Сокол Г. М. Структурна модифікація сапонітових глин кислотною обробкою / Г. М. Сокол // Наукові нотатки : міжвузівський збірник наукових праць / Луцький національний технічний університет. – Луцьк, 2017. – № 56. – С. 149–153.

9. Сокол Г. М. Очищення нафтопродуктів та вилучення їх слідових кількостей з пожежного сміття за допомогою сорбційних матеріалів для подальшого дослідження хроматографічним методом / Г. М. Сокол, А. Я. Ганзюк, О. П. Шелестюк, О. М. Міщук // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – Хмельницький, 2017. – № 1. – С. 87–94.

10. Sokol G. M. Saponite is an environmentally friendly universal sorbent / G. M. Sokol, A. Y. Ganzyuk, D. S. Kamenskyh // Abstracts: Ninth International Scientific Congress “A secure world understanding-trust-responsibility” [CD supplament]. – Poznan, Poland, 4–7 July, 2013.

11. Sokol G. M. Research of the adsorptivity of sorbents on the basis of natural mineral saponite / G. M. Sokol, S. A. Karvan, A. Y. Ganzyuk // Abstracts: International Conference “Modern Problems of Surface Chemistry” Chuiko Institute of Surface Chemistry, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 20–21 May, 2014. – P. 179.

12. Нефтепродукты. Методы определения фракционного состава : ГОСТ 2177-99. – [Взамен ГОСТ 2177-82]. – Минск : Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации; К. : Гостстандарт Украины, 1999. – 23 с.

13. Топливо для двигателей. Исследовательский метод определения октанового числа : ГОСТ 511-82. – Взамен ГОСТ 511-66. – СССР: Постановление Государственного комитета СССР по стандартизации от 20.09.82. – 14 с.

14. Бензины. Метод определения бензола и суммарного содержания ароматических углеводородов : ГОСТ 29040-91 / СССР : Постановление Государственного комитета СССР по управлению качеством продукции и стандартом от 26.06.91. – 12 с.

References

1. Klasyfikatsiia vydiv palyva [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : http://ukrmap.su/uk-g8/869.html (Data zvernennia 05.10.2013)

2. Chukaieva I.O. Formuvannia ukrainskoho rynku nafty i naftoproduktiv / I.O. Chukaieva // Ekonomika Ukrainy. – 2001. – № 2. – S. 84–86.

3. Ekspluatatsiini kharakterystyky dyzelnoho palnoho [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : http://ben4in.blogspot.com/p/blog-page_6269.html.

4. Smidovich E.V. Tehnologija pererabotki nefti / E.V. Smidovich. – M. :Himija, 1980. – Ch. 2. – 328 s.

5. Dubinin M.M. Adsorbcija i poristost' / M.M. Dubinin. – M. : VAHZ, 1972. – 127 s.

6. Thomas W.J. Adsorption technology and design / W.J. Thomas, B. Crittenden. – Oxford : Butterworth Heinemann, 1998. – R. 8–30.

7. Kefer R.G. Adsorbenty, ih poluchenie, svojstva i primenenija / R.G.Kefer, N.F. Danilov. V.Z. Pojlov. – L. : Nauka, 1978. – 204 s.

8. Sokol H. M. Strukturna modyfikatsiia saponitovykh hlyn kyslotnoiu obrobkoiu / H. M. Sokol // Naukovi notatky : mizhvuzivskyi zbirnyk naukovykh prats / Lutskyi natsionalnyi tekhnichnyi universytet. – Lutsk, 2017. – № 56. – S. 149–153.

9. Sokol H. M. Ochyshchennia naftoproduktiv ta vyluchennia yikh slidovykh kilkostei z pozhezhnoho smittia za dopomohoiu sorbtsiinykh materialiv dlia podalshoho doslidzhennia khromatohrafichnym metodom / H. M. Sokol, A. Ya. Hanziuk, O. P. Shelestiuk, O. M. Mishchuk // Herald of Khmelnytskyi National University. – Khmelnytskyi, 2017. – № 1. – S. 87–94.

10. Sokol G. M. Saponite is an environmentally friendly universal sorbent / G. M. Sokol, A. Y. Ganzyuk, D. S. Kamenskyh // Abstracts: Ninth International Scientific Congress “A secure world understanding-trust-responsibility” [CD supplament]. – Poznan, Poland, 4–7 July, 2013.

11. Sokol G. M. Research of the adsorptivity of sorbents on the basis of natural mineral saponite / G. M. Sokol, S. A. Karvan, A. Y. Ganzyuk // Abstracts: International Conference “Modern Problems of Surface Chemistry” Chuiko Institute of Surface Chemistry, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 20–21 May, 2014. – P. 179.

12. Nefteprodukty. Metody opredelenija frakcionnogo sostava : GOST 2177-99. – [Vzamen GOST 2177-82]. – Minsk : Mezhgos. sovet po standartizacii, metrologii i sertifikacii; K. : Goststandart Ukrainy, 1999. – 23 s.

13. Toplivo dlja dvigatelej. Issledovatel'skij metod opredelenija oktanovogo chisla : GOST 511-82. – Vzamen GOST 511-66. – SSSR: Postanovlenie Gosudarstvennogo komiteta SSSR po standartizacii ot 20.09.82. – 14 s.

14. Benziny. Metod opredelenija benzola i summarnogo soderzhanija aromaticheskih uglevodorodov : GOST 29040-91 / SSSR : Postanovlenie Gosudarstvennogo komiteta SSSR po upravleniju kachestvom produkcii i standartom ot 26.06.91. – 12 s.

Рецензія/Peer review : 17.11.2018 р. Надрукована/Printed :15.2.2019 р.
Рецензент: д.с-.г.н., доц. Міронова Н.Г.

DOI 10.31891/2307-5732-2019-269-1-91-95
УДК 658.62:005.52

О.Ф. БОГДАНОВА, А.О. ТІХОСОВА, В.В. ОЛІФІРУК, О.С. ЗАБРОДІНА
Херсонський національний технічний університет

ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ НЕНАРКОТИЧНИХ КОНОПЕЛЬ В РІЗНИХ СФЕРАХ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

В даній роботі проведена економічна оцінка ефективності удосконалення технології одержання трести із соломи ненаркотичних конопель та її механічної обробки до отримання волокна різного функціонального призначення.

Ключові слова: ненаркотичні коноплі, треста, механічна обробка, економічна ефективність.

O.F. BOHDANOVA, A.O. TIKHOSOVA, V.V. OLIFIRUK, O.S. ZABRODINA
Kherson National Technical University

ECONOMIC JUSTIFICATION OF THE FEASIBILITY OF USING NON-NARCOTIC CANNABIS IN VARIOUS FUNCTIONAL AREAS

The technology has been developed and the selection of the necessary equipment for the machining of the stalks of non-narcotic monoeciousy hemp trusts has been carried out in order to obtain the same type of cannabis fiber of various functional purposes. A flow chart for the machining of the stalks of non-narcotic monoecious hemp trusts is proposed, according to which the stalks of the YUSO-31 variety trusts were ground into lengths of 20, 30, and 40 mm in an experimental guillotine type machine. The composition of the processing line for obtaining fibers of various functional purposes from trusts of non-narcotic monoecious hemp, as well as using the operation of chopping the stems to a certain length in front of the meat grinder of the preparatory unit and pulverizing the raw fiber on the rough-combing machine and fine-combing machines. The use of these operations, due to the change in the nature and intensity of the mechanical effects, allows to obtain fibers suitable for use in the textile, pharmaceutical, pulp and paper industries. Spheres of further use of fibers in various modes of chopping the stems of trusts of non-narcotic monoecious hemp in the textile, pharmaceutical, pulp and paper industries are determined. It is established that when chopping stalks trusts for a length of 40 mm receive fiber that is most suitable for use in the textile industry in the manufacture of mixed yarn. After shredding the stems, the trusts of 30 mm produce fiber for the production of sanitary goods using new technology. When the stems are crushed by 20 mm trusts, fiber is obtained which, after processing, is most suitable for pulping. The feasibility of introducing an advanced technology for producing trusts from non-narcotic monoecious hemp straw from its mechanical processing under production conditions is economically justified. It is shown that the economic effect of obtaining fiber according to the proposed technology amounts to UAH 9620 per ton of fiber due to an increase in the percentage of yield of hemp cottonin and fibers suitable for use in the textile, pharmaceutical and pulp and paper industries.

Keywords: non-narcotic cannabis, trust, tooling, economic efficiency.

Вступ

Коноплі є одним із найцінніших видів текстильної сировини, традиційної для нашої держави, яка зараз майже не використовується вітчизняними виробниками.

У розвинутих країнах світу, навпаки, останнім часом спостерігається зростання попиту на екологічно чисті вироби, виготовлені з натуральної сировини, незважаючи на велику різноманітність товарів із синтетичних і штучних волокон. Слід зазначити, що завдяки специфічним природним властивостями натуральних волокон, у тому числі й конопляних, вони не можуть бути замінені іншими видами волокон при виготовленні певного асортименту виробів. Крім того, волокно конопель може замінити навіть лляне волокно в найрізноманітніших сферах застосування.

Тому сьогодні коноплі привертають до себе велику увагу як дослідників, так і виробників. Адже, по-перше, це технічна культура, яка здатна накопичувати величезну біологічну масу порівняно з іншими культурами, по-друге, вона може використовуватися для виготовлення необмеженого асортименту виробів у різних галузях промисловості, і, по-третє, здатна очищувати забруднені території, що сприяє збереженню навколишнього середовища.

Протягом останніх років у світі спостерігається збільшення посівних площ, відведених під коноплі, та динамічне зростання обсягів виробництва коноплеволокна, що зумовлено притаманними тільки йому специфічними властивостями (високою міцністю, гігроскопічністю, підвищеною теплопровідністю, стійкістю до гниття та зношування) і наявністю дозволених для промислового вирощування сортів ненаркотичних однодомних конопель. Підтвердженням цього є представлена на рис. 1 динаміка обсягів виробництва коноплеволокна у світі [1].

Найвагоміший внесок у вирішення проблеми одержання ненаркотичних конопель із вмістом каннабіноїдів менше ніж 0,08 % та розроблення інноваційних технологій їх первинного перероблення зробили відомі вчені: Голобородько П.А., Сенченко Г.І., Вировець В.Г., Мигаль М.Д., Ситник В.П., Пашин Є.Л., Гілязетдінов Р.Н., Лайко І.М. та зарубіжні науковці – Kozlowski R., Manys S., Mankowaski J., Hocman M., Dir. H., Janick J [2].

Останнім часом, внаслідок відміни обов’язкової охорони, зросли посівні площі, відведені під ненаркотичні коноплі, з’явилися інноваційні напрями використання технічних конопель: енергетичний (ТОВ «Еліфібр»), текстильний (ТОВ «Агро-Ханф»), олійно-харчовий (ФГ «Кравець О.П.», «Кунчанський») та ін. У науково-дослідних роботах багато уваги приділяється розвитку наукових основ створення та

впровадження сортів ненаркотичних конопель. Значний внесок у вирішення цієї проблеми був зроблений вченими Дослідної станції луб'яних культур Інституту сільського господарства Північного Сходу НААН України (м. Глухів Сумської обл.) [3]. Фундаментальні дослідження з оптимізації технологічних процесів перероблення конопель проводяться в Інституті механізації та електрифікації сільського господарства НААН України, Київському національному університеті технологій та дизайну, Херсонському національному технічному університеті.

Рис. 1. Динаміка обсягів виробництва коноплеволокна у світі

Традиційні технології первинного перероблення конопель, які застосовувалися в промисловості для дводомних наркотичних конопель, не можуть бути перенесені без глибокого наукового коригування на перероблення ненаркотичних конопель, у зв'язку зі значними відмінностями в морфологічній і анатомічній будові стебел матірки та плосконі від стебел ненаркотичних конопель. У результаті останніх досліджень Гілязетдінова Р.Н. і Коропченка С.П. розроблена технологія перероблення стебел ненаркотичних конопель в однотипне волокно. Цими вченими здійснені перші наукові розробки з поглибленого перероблення стебел ненаркотичних конопель. У зазначених роботах описано технологію та запропоновано обладнання для перероблення стебел соломи ненаркотичних конопель. У результаті впровадження цих робіт отримано однотипне луб'яне волокно, визначено його фізико-механічні характеристики, але сфери його застосування недостатньо обґрунтовані [4].

У результаті аналізу наукової літератури було відзначено, що під час попередніх досліджень, спрямованих на вдосконалення способів приготування трести конопель, не враховувалися особливості сучасних сортів ненаркотичних однодомних конопель, не здійснювався вибір оптимальних технологічних режимів для холодноводного мочіння стебел цієї форми конопель, не визначалися технологічні параметри даного процесу.

Існуючі на даний час традиційні способи механічної обробки дають можливість отримати довге та коротке коноплеволокно, яке має обмежену сферу застосування. Наведені вище недоліки традиційних технологій механічної обробки є свідченням необхідності нових підходів, які повинні бути спрямовані на удосконалення традиційних і розробку новітніх технологій одержання трести та її механічної обробки.

На даний час в Україні селекціонерами створено нові високопродуктивні сорти ненаркотичних однодомних конопель, однак обробка їх за традиційною технологією не дозволяє одержувати волокно високої якості [5]. У зв'язку з цим перед коноплепереробною галуззю зараз постала необхідність в удосконаленні найбільш ефективних способів одержання зі стебел ненаркотичних однодомних конопель високоякісного волокна, придатного для виготовлення широкого асортименту виробів. Ефективна первинна обробка стебел конопель неможлива без удосконалення технологій та забезпечення коноплепереробних підприємств новим, більш високопродуктивним ефективним технологічним обладнанням, застосування якого сприятиме поліпшенню якості, розширенню асортименту та зменшенню собівартості волокна. У сучасних умовах необхідний новий підхід до технологій первинної обробки стебел ненаркотичних однодомних конопель. удосконалена технологія механічної обробки стебел ненаркотичних конопель, запропонована С.П. Коропченко, дозволяє одержувати неорієнтований луб зі стебел ненаркотичних конопель. Отриманий за даною технологією конопляний луб характеризується хаотичним розташуванням волокон, довжина яких може сягати 80–120 см, та недостатнім для прядіння ступенем розщепленості волокна, тому подальше його використання потребує додаткової обробки. Суттєвою перевагою цієї технології є низький вміст костриці, який становить 1-2% [6].

На основі аналізу літературних джерел та виробничих досягнень у коноплепереробній галузі зроблено висновок, що ефективне первинне оброблення стебел конопель неможливе без удосконалення технологій та забезпечення коноплепереробних підприємств новим, більш високопродуктивним ефективним технологічним обладнанням, застосування якого сприятиме поліпшенню якості, розширенню асортименту та зменшенню собівартості волокна. У сучасних умовах необхідний новий науковий підхід до розроблення технологій первинного оброблення стебел ненаркотичних однодомних конопель з поліпшенням якості та розширенням сфери застосування. Тому економічна оцінка ефективності удосконалення технології та її механічної обробки стебел ненаркотичних однодомних конопель з метою одержання волокном різного функціонального призначення є актуальною.

Експериментальна частина

Враховуючи позитивний досвід наукової роботи, яка здійснюється на кафедрі переробки, стандартизації і сертифікації сировини Херсонського національного технічного університету в напрямку

котонізації льону-довгунця, запропоновано удосконалення технології одержання конопляних волокон різного функціонального призначення із трести ненаркотичних однодомних конопель, особливістю якої є включення механічних операцій її подрібнення на відрізки різної довжини й чесання на грубо- та тонкочесальних машинах [7].

Розрахунок економічної ефективності удосконалення технології здійснювали з урахуванням економічної ефективності традиційних технологій одержання довгого та короткого коноплеволокна.

Впровадження удосконаленої технології одержання трести із соломи ненаркотичних однодомних конопель та її механічної обробки не передбачає одержання довгого тіпаного волокна. Як відомо, під час механічної обробки на м'яльно-тіпальному агрегаті за традиційною технологією вихід довгого волокна дорівнює лише 15–17% від загального виходу волокна з трести, а решту становить менш цінне коротке коноплеволокно. Слід також зауважити, що на вітчизняному ринку відсутній попит на довге та коротке волокно конопель, а якісні показники цих двох видів продукції коноплепереробних підприємств не дозволяють реалізовувати її за високими цінами на світовому ринку. Запропонована технологія механічної обробки трести конопель має великі переваги порівняно з традиційною технологією. По-перше, дана технологія дозволяє виділити з трести майже все волокно, що міститься в ній. По-друге, завдяки відсутності відходів тіпання довгого волокна, що утворюються під час традиційної механічної обробки стебел трести, а отже, і відсутності необхідності їх подальшої переробки, підприємства можуть скоротити витрати на отримання менш цінного короткого коноплеволокна. По-третє, якісні показники коноплеволокна, одержаного за новою технологією, дозволяють застосовувати його без додаткової підготовки у трьох напрямках: для виробництва текстильної продукції, для виготовлення спеціальних медичних виробів, а також для отримання целюлози.

У табл. 1, 2 наведено техніко-економічні показники ефективності застосування традиційної та запропонованої технологій, а в табл. 3 – загальні витрати на одержання волокна з однієї тони трести, які складаються з витрат на заробітну плату основних і допоміжних робітників, на електроенергію, на утримання та експлуатацію обладнання тощо.

Так, якщо з однієї тони трести ненаркотичних однодомних конопель за традиційними технологіями обробки отримують 15–17% найбільш цінного довгого тіпаного коноплеволокна та 83–85% менш цінного короткого коноплеволокна, то очікуваний дохід від реалізації цього коноплеволокна становитиме 518 грн/т (табл. 1).

Таблиця 1

Техніко-економічні показники ефективності застосування традиційної технології одержання коноплепродукції

Характеристика коноплепродукції			Вихід волокна за традиційними технологіями механічної обробки, %	Очікуваний дохід від реалізації одержаних продуктів D_N, грн./т
Назва	Ціна за 1 тонну			
	дол. США	грн.		
Довге тіпане коноплеволокно	123	985	15-17	158
Коротке коноплеволокно	57	429	83-85	360
Σ			100	518

При довжині подрібнення стебел трести 40 мм вихід волокна, яке може бути використано для одержання конопляного котоніну, згідно з даними табл. 2, становить 55%, волокна, придатного для виробництва медичної вати – 23% та целюлози – 22%.

Таблиця 2

Техніко-економічні показники ефективності впровадження запропонованої технології одержання трести із соломи ненаркотичних однодомних конопель та її механічної обробки при довжині подрібнення стебел трести 20 мм, 30 мм, 40 мм

Характеристика коноплепродукції				Вихід волокна при довжині подрібнення стебел трести 20 мм, 30 мм, 40 мм, %			Очікуваний дохід від реалізації одержаних продуктів D_N, грн./т		
№	Назва	Ціна за 1 тонну							
		дол. США	грн.	20 мм	30 мм	40 мм	20 мм	30 мм	40 мм
1.	Котонін конопляний	1400	11200	-	-	55	-	-	6160
2.	Вата медична нестерильна	2200	17600	-	59	23	-	6688	4048
3.	Целюлоза небілена	414	3316	100	41	22	3316	2050	730
Σ				100	100	100	3316	8744	10938

Відповідно до даних, наведених у табл. 2, при довжині подрібнення стебел трести 30 мм вихід волокна, яке може бути використано для одержання конопляного котоніну, становить 0%, волокна, придатного для виробництва медичної вати – 38% та целюлози – 62%. При довжині подрібнення стебел трести 20 мм вихід волокна, яке може бути використано для одержання конопляного котоніну, становить 0%, волокна, придатного для виробництва медичної вати – 0% та целюлози – 100%.

Таблиця 3

Розрахунок витрат на отримання волокна з 1 тони трести

Витрати	Витрати на одиницю продукції за запропонованою технологією, грн./т
1. Сировина	600
2. Заробітна плата основних і допоміжних робітників	30
3. Електроенергія	100
4. Утримання та експлуатація обладнання	70
Разом	800

Сумарний дохід від реалізації 1 т коноплеволокна різного функціонального призначення, отриманого при різній довжині подрібнення стебел трести, розраховують за формулою:

$$\sum_{i=1}^{N} D_c = D_1 + D_{i+1} + \cdots + D_N, \quad (1)$$

У даному випадку формула (1) набуває вигляду:

$$\sum_{i=1}^{3} D_c = D_1 + D_2 + D_3, \quad (2)$$

де D_1 – очікуваний дохід від реалізації конопляного котоніну, грн.;

D_2 – очікуваний дохід від реалізації медичної вати, грн.;

D_3 – очікуваний дохід від реалізації целюлози, грн.

Результати розрахунку сумарного доходу від реалізації 1 т коноплеволокна різного функціонального призначення, отриманого при різній довжині подрібнення стебел трести, представлено в табл. 2.

Визначимо економічний ефект від реалізації коноплеволокна, одержаного за новою технологією при різний довжині подрібнення стебел трести ненаркотичних однодомних конопель E_{40}, E_{30}, E_{20} за формулою:

$$E = \sum_{i=1}^{N}[(D_1 + D_2 + D_3) - (D_4 + D_5)] - B, \quad (3)$$

де D_1 – очікуваний дохід від реалізації конопляного котоніну, грн./т;

D_2 – очікуваний дохід від реалізації медичної вати, грн./т;

D_3 – очікуваний дохід від реалізації целюлози, грн./т;

D_4 – очікуваний дохід від реалізації довгого тіпаного коноплеволокна, грн./т;

D_5 – очікуваний дохід від реалізації короткого коноплеволокна, грн./т;

B - розрахунок витрат на отримання волокна з 1 тони трести за запропонованою технологією, грн./т

$$E_{40} = [(6160 + 4048 + 730) - (158 + 360)] - 800 = 9620 \text{ грн./т}$$

$$E_{30} = [(6688 + 2056) - (158 + 360)] - 800 = 7426 \text{ грн./т}$$

$$E_{20} = [3316 - (158 + 360)] - 800 = 1998 \text{ грн./т}$$

Результати проведеного порівняльного аналізу ефективності застосування запропонованої технології при різній довжині подрібнення стебел трести ненаркотичних однодомних конопель показали, що найбільший економічний ефект у розмірі 9620 грн/т досягається при реалізації волокна, отриманого при довжині подрібнення стебел трести 40 мм. Даний варіант обробки дозволяє одержати волокно, придатне для застосування в текстильній, фармацевтичній та целюлозно-паперовій галузях. Економічний ефект у розмірі 7426 грн/т досягається при реалізації волокна, отриманого при довжині подрібнення стебел трести 30 мм, оскільки саме такий варіант обробки дозволяє одержати волокно, придатне для застосування у фармацевтичній та целюлозно-паперовій галузях. Найменший економічний ефект –1998 грн/т – досягається під час реалізації волокна, отриманого при довжині подрібнення стебел трести 20 мм, оскільки такий спосіб обробки дозволяє одержати волокно, придатне лише для переробки в целюлозно-паперовій промисловості.

Висновки

1. Економічно обґрунтовано доцільність впровадження удосконаленої технології одержання трести із соломи ненаркотичних однодомних конопель і її механічної обробки у виробничих умовах.

2. Визначено, що найбільший економічний ефект від одержання волокна, за удосконаленою технологією становить 9620 грн на одну тонну волокна за рахунок збільшення відсотку виходу конопляного котоніну та волокон, придатних для застосування в фармацевтичній та целюлозно-паперовій галузях промислового виробництва.

Література

1. Дудукова С.В. Деякі тенденції розвитку льонарства та коноплярства у світі / С.В. Дудукова // Проблеми і перспективи в селекції, генетиці, технології вирощування, збирання, переробці та стандартизації луб'яних культур : зб. наук. праць за матеріалами наук.-техн. конф. молодих вчених. – Глухів : Інститут луб'яних культур УААН, 2006. – С. 168.

2. Голобородько П.А. Льонарство та коноплярство: проблеми і перспективи / П.А. Голобородько, В.П. Ситник, В.Г. Баранник // Селекція, технологія виробництва та первинної переробки льону і конопель : зб. наук. праць. – Глухів : Інститут луб'яних культур УААН, 2004. – С. 177–192.

3. Вировець В.Г. Сучасна колекція конопель (CANNABIS SATIVA L.) як невичерпне джерело вихідного матеріалу для селекції / В.Г. Вировець, І.М. Лайко, Г.І. Кириченко та ін. // Селекция, технология производства и первичной переработки льна и конопли : зб. наук. праць. – Глухів : Інститут луб'яних культур УААН, 2007. – Вип. 4. – 221 с.

4. Гилязетдинов Р.Н. Исследования по переработке и уборке льна и конопли / Р.Н. Гилязетдинов // Нове в селекції, генетиці, технології вирощування, збирання, переробки та стандартизації луб'яних культур УААН, 2004. – С. 123–127.

5. Мигаль М.Д. Відмінність сортів конопель за співвідношенням статевих типів і формою суцвіття / М.Д. Мигаль, Т.І. Ступак // Нові наукові дослідження у льонарстві та коноплярстві України : матеріали наук.-техн. конф. молодих вчених 23 листопада 2005 р. – Суми : ВВП «Мрія-1»ТОВ, 2006. – С. 22–29.

6. Коропченко С.П. Розробка технологічного процесу виділення лубу конопель : дис. … кандидата технічних наук : 09.00.07 / Коропченко Сергій Петрович. – Херсон, 2007. – 137 с.

7. Патент на корисну модель № 56855. Спосіб отримання целюлози / Чурсіна Л.А., Богданова О.Ф., Ляліна Н.П., Резвих Н.І. – 25.01.2011. Бюл. № 2. – 4 с.

References

1. Dudukova S.V. Deiaki tendentsii rozvytku lonarstva ta konopliarstva u sviti / S.V. Dudukova // Problemy i perspektyvy v selektsii, henetytsi, tekhnolohii vyroshchuvannia, zbyrannia, pererobtsi ta standartyzatsii lubianykh kultur : zb. nauk. prats za materialamy nauk.-tekhn. konf. molodykh vchenykh. – Hlukhiv : Instytut lubianykh kultur UAAN, 2006. – S. 168.

2. Holoborodko P.A. Lonarstvo ta konopliarstvo: problemy i perspektyvy / P.A. Holoborodko, V.P. Sytnyk, V.H. Barannyk // Selektsiia, tekhnolohiia vyrobnytstva ta pervynnoi pererobky lonu i konopel : zb. nauk. prats. – Hlukhiv : Instytut lubianykh kultur UAAN, 2004. – S. 177–192.

3. Vyrovets V.H. Suchasna kolektsiia konopel (CANNABIS SATIVA L.) yak nevycherpne dzherelo vykhidnoho materialu dlia selektsii / V.H. Vyrovets, I.M. Laiko, H.I. Kyrychenko ta in. // Selektsyia, tekhnolohyia proyzvodstva y pervychnoi pererabotky lna y konoply : zb. nauk. prats. – Hlukhiv : Instytut lubianykh kultur UAAN, 2007. – Vyp. 4. – 221 s.

4. Giljazetdinov R.N. Issledovanija po pererabotke i uborke l'na i konopli / R.N. Giljazetdinov // Nove v selekciї, genetici, tehnologiї viroshhuvannja, zbirannja, pererobki ta standartizaciї lub'janih kul'tur UAAN, 2004. – S. 123–127.

5. Myhal M.D. Vidminnist sortiv konopel za spivvidnoshenniam statevykh typiv i formoiu sutsvittia / M.D. Myhal, T.I. Stupak // Novi naukovi doslidzhennia u lonarstvi ta konopliarstvi Ukrainy : materialy nauk.-tekhn. konf. molodykh vchenykh 23 lystopada 2005 r. – Sumy : VVP «Mriia-1»TOV, 2006. – S. 22–29.

6. Koropchenko S.P. Rozrobka tekhnolohichnoho protsesu vydilennia lubu konopel : dys. … kandydata tekhnichnykh nauk : 09.00.07 / Koropchenko Serhii Petrovych. – Kherson, 2007. – 137 s.

7. Patent na korysnu model № 56855. Sposib otrymannia tseliulozy / Chursina L.A., Bohdanova O.F., Lialina N.P., Rezvykh N.I. – 25.01.2011. Biul. № 2. – 4 s.

Рецензія/Peer review : 17.11.2018 р. Надрукована/Printed :15.2.2019 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Чурсіна Л.А.

DOI 10.31891/2307-5732-2019-269-1-96-99
УДК 677.075:620.17

С.Ю. БОБРОВА, Д.О. ШИПКО, Л.Є. ГАЛАВСЬКА
Київський національний університет технологій та дизайну

ДЕФОРМАЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ ТРИКОТАЖУ ДЛЯ ЗАХИСТУ РУК ВІД МЕХАНІЧНИХ УШКОДЖЕНЬ

Запропоновано структуру трикотажу для суцільнов'язаних засобів індивідуального захисту рук від механічних ушкоджень при роботі з гострими ріжучими предметами. Зразки трикотажу виготовлено із використанням надміцної високомолекулярної поліетиленової нитки у комбінації з високорозтяжною поліуретановою ниткою одинарним футерованим переплетенням на базі гладі при різних заправних даних в'язального устаткування – трьох рівнях глибини кулірування. Досліджено вплив технологічних параметрів роботи в'язальної машини на деформаційні властивості трикотажу та його релаксаційні характеристики.

Ключові слова: *засоби індивідуального захисту рук,* трикотаж підвищеної міцності, футероване переплетення, захисні рукавні вироби, деформаційні властивості, *високомолекулярна поліетиленова нитка.*

S. BOBROVA, D. SHYPKO, L. HALAVSKA
Kyiv National University of Technologies and Design

DEFORMATION PROPERTIES OF KNITWEAR FOR HAND PROTECTION AGAINST MECHANICAL DAMAGES

The aim of the research to explore the deformation properties of knitted fabric for the manufacture of hand protection means against mechanical damage by sharp cutting objects. The paper proposes a knitting structure for seamless protective products against mechanical hazards. Knitwear samples are made using ultra-high molecular weight polyethylene yarn in combination with a high-tenacity elastan yarn by a single weft fleecy knitting structure on the plain basis with different initial knitting process data – three levels of knockover depth. Knitwear is produced on a double flat glove knitting machine 8 gauge. To define the load value by deformation the indicators of the tensile strength of the knitwear samples along the courses are determined. The tension of knitted fabric samples proceeded under the load of 5% of the breaking load. The influence of knitting process parameters of a glove machine on the properties of knitwear and its relaxation characteristics has been investigated. It is established that increase of the knockover depth leads to a proportional increase the deformation value under the action of applied tensile force and deformation relaxation after the removal of the load. This makes it possible to predict the deformation characteristics of high strength knitwear in accordance with the chosen knitting density. Increase the part of the permanent deformation with an increase the knockover depth is more evident in the range of knockover depth 3,75÷4,0 mm. This property should be taken into account when designing the loop structure of protective products. The parameters of knitting, in which the knitwear with the optimal parameters of deformation properties can be produced, was determined. Knitting structure can be recommended for the manufacture of seamless knitted products of small diameter and use them to protect hands from various mechanical damage.

Keywords: hand protection means, hyper strength knitted fabrics, fleecy knitting structure, protected sleeves, deformation properties, *ultra-high molecular weight polyethylene yarn.*

Вступ

Асортимент текстильних виробів для індивідуального захисту від різних ушкоджень при роботі в умовах механічної небезпеки промислових виробництв, при зайнятті спортом або при виконанні небезпечних трюків, доволі широкий. Це насамперед вироби для захисту верхніх і нижніх кінцівок – різні рукавні або панчішні вироби, конструкція яких визначається в залежності від того, які ділянки рук або ніг вони захищають: рукавички, напіврукавички, рукавиці, надолонники, напульсники, налокітники, нарукавники, наколінники, гомілкостопи, напівпанчохи. Крім того, деякі види спорту також для пошиття спеціальних костюмів потребують використання полотен з підвищеними характеристиками міцності. Такі текстильні вироби повинні мати підвищену стійкість до різних механічних впливів – тертя, проколів, порізів, вібрацій або ударів [1, 2]. Розвиток текстильних технологій дає можливість виготовляти захисні вироби за безвідходною безшовною технологією, що дозволяє, по-перше, економно використовувати високовартісну сировину, а по друге, забезпечити задану конфігурацію у процесі в'язання. Необхідна стійкість до дії механічних навантажень забезпечується за рахунок характеристик вихідних надміцних ниток, виробництво і використання яких у різних галузях промисловості постійно зростає. Не менш важливими є вимоги до ергономіки виробів – вони повинні забезпечувати комфорт, свободу рухів та спритність для виконання маніпулятивних завдань, що забезпечується насамперед конструкцією виробу, структурою текстильного матеріалу та властивостями сировини [3]. У розрізі цього питання особливий інтерес представляє вивчення процесів деформації та релаксації деформації матеріалів при дії навантажень, які близькі до умов експлуатації виробів з метою прогнозування їх механічних властивостей в умовах їх безпосереднього використання.

Постановка задачі

Останнім часом для виготовлення засобів для індивідуального захисту від механічних ушкоджень використовують параарамідні, метаарамідні та високомолекулярні поліетиленові нитки у чистому вигляді або у комбінації з поліамідними, поліефірними та іншими видами ниток. Стрімке зростання виробництва надміцних волокон та ниток на світовому ринку призвело до появи нових технологій виготовлення різного асортименту текстилю технічного призначення, виробів для оборонно-промислового сектору та спорту. Текстильні захисні матеріали підвищеної міцності повинні мати не лише необхідну жорсткість для протистояння шкідливим механічним впливам, а й певну еластичність, щоб максимально гасити цю

механічну дію й забезпечувати необхідний комфорт. Тут першочергову роль має структура переплетення, яка характеризується певною товщиною та деформаційними властивостями. Питання протікання процесів релаксації та повзучості надміцних арамідних ниток, тканин та шнурів розглянуто у роботі [4]. Проведений аналіз деформаційних властивостей цих матеріалів виявив роль впливу геометричних розмірів, лінійної густини сировини, способу переплетення ниток і компонентного складу на їх деформаційні властивості. Авторами доведено, що при дослідженні процесів релаксації та повзучості тканин відбувається перебудова макроструктури геометричного характеру за рахунок зміни відстаней між нитками. Тільки тоді коли зміни макроструктури геометричного характеру будуть вичерпані, включається механізм релаксації і повзучості самих арамідних ниток. Питання впливу структури трикотажу підвищеної міцності, виготовленого при різних технологічних параметрах роботи в'язального устаткування, на його деформаційні властивості до цього часу майже не розглядалось, тому потребує детального вивчення з метою розробки певних рекомендацій щодо його виготовлення.

Аналіз видів сировини, що забезпечить готовим виробам підвищену стійкість до тертя та порізу, а також необхідні деформаційні властивості, дозволив обрати для виготовлення захисних трикотажних рукавів трубчастої форми високомолекулярну поліетиленову нитку у комбінації з високорозтяжною поліуретановою ниткою.

Трикотажний виріб циліндричної форми виготовлено на плосков'язальному рукавичному автоматі 8 класу одинарним кулірним футерованим переплетенням з рапортом прокладанням високорозтяжної футерної нитки 1+3 у кожному четвертому ряді (рис. 1). Така структура трикотажу забезпечує готовому виробу окрім необхідних показників міцності достатню еластичність, пружність, зручність та комфортність, що дозволить робітникам безперешкодно одягати і знімати виріб, а також виконувати необхідні функціональні обов'язки. Запропонована структура може бути використана для виготовлення засобів індивідуального захисту від ріжучих предметів, що підтверджено відповідними дослідженнями [5].

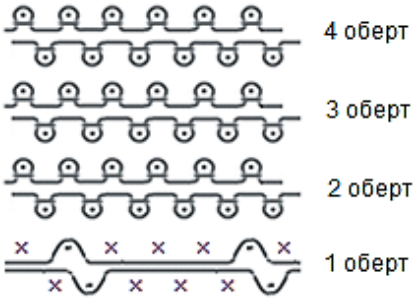


Рис. 1. Графічний запис переплетення трикотажу для захисного рукава

Експериментальна частина

Для реалізації поставленої задачі в умовах в'язальної лабораторії Київського національного університету технологій та дизайну на рукавичному автоматі ПА-8 виготовлено зразки кулірного трикотажу футерованого переплетення при різних рівнях глибини кулірування і постійних значеннях лінійної густини сировини, вхідного натягу ниток та зусилля відтягування трикотажу. У якості сировини ґрунту трикотажу обрано високомолекулярну поліетиленову нитку торгової марки Doyentrontex (компанія «Beijing Tongyizhong», Китай) [6] лінійної густини 132 текс, футерної нитки – високорозтяжну армовану нитку с поліуретановим сердечником лінійної густини 100 текс. Зразки трикотажу виготовлені при трьох рівнях глибини кулірування, що змінювалася шляхом переміщення кулірного клина по висоті (h_k = 3,5; 3,75; 4,0 мм).

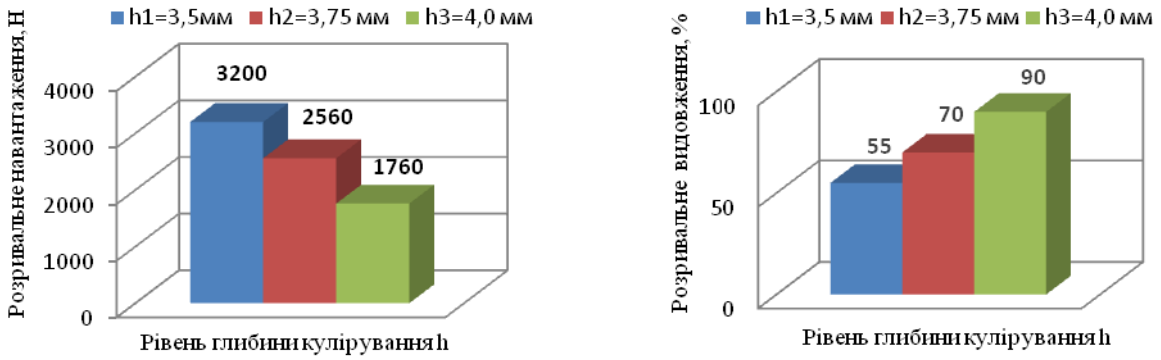
З метою встановлення величини навантаження для дослідження характеру деформації та релаксації деформації розтягу зразків трикотажу визначено їх розривальне зусилля та розривальне видовження вдовж петельного стовпчика на розривній машині марки AVK Budapest (Угорщина) згідно з [7] (рис. 2).

Рис. 2. Дослідження розривальних характеристик трикотажу

Показники розривального зусилля вздовж лінії петельного стовпчика наведені на діаграмі (рис. 3). Одержані результати досліджень свідчать, що зі збільшенням глибини кулірування на 14,28 % розривальне навантаження зменшується на 45%. Тобто інтервал зміни глибини кулірування 0,25 мм (близько 5%) призводить до зниження розривального зусилля на 15%. Це пояснюється тим, що зі зменшенням щільності трикотажу, відповідно зменшується кількість петельних стовпчиків, що опираються розриву.

Діаграми розривального навантаження та видовження дослідних зразків трикотажу, представлені на рис. 3, наглядно ілюструють пропорційний вплив зміни щільності в'язання в діапазоні зміни глибини кулірування від 3,5 мм до 4,0 мм з інтервалом варіювання 0,25 мм. Збільшення величини розривального видовження зі збільшенням глибини кулірування зумовлено ступенем орієнтації нитки в петлях кулірного трикотажу та відповідно пропорційним збільшенням відрізка нитки в області у напрямку голкової та платинної дуг, з яких саме і відбувається перерозподіл нитки в палички під час розтягу у напрямку лінії

петельного стовпчика.



а) б)

Рис. 3. Діаграми розривального навантаження (а) та видовження (б) дослідних зразків трикотажу

Масу навантаження при дослідженні релаксаційних процесів встановлено як 5% від розривального навантаження дослідного зразка трикотажу, виробленого при середньому рівні глибини кулірування, що склало 12,5 кг. Для визначення характеру зміни деформації та релаксації деформації використано релаксометр типу «стійка» при постійному навантаженні. Дослідження проведено у відповідності до ГОСТ 8847-85 [7].

На підставі одержаних експериментальних даних побудовані відповідні діаграми, що наглядно ілюструють характер зміни деформації і релаксації деформації розтягу у часі (рис. 4).

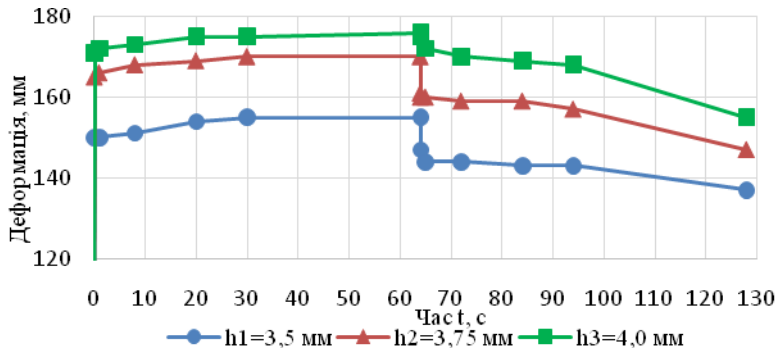
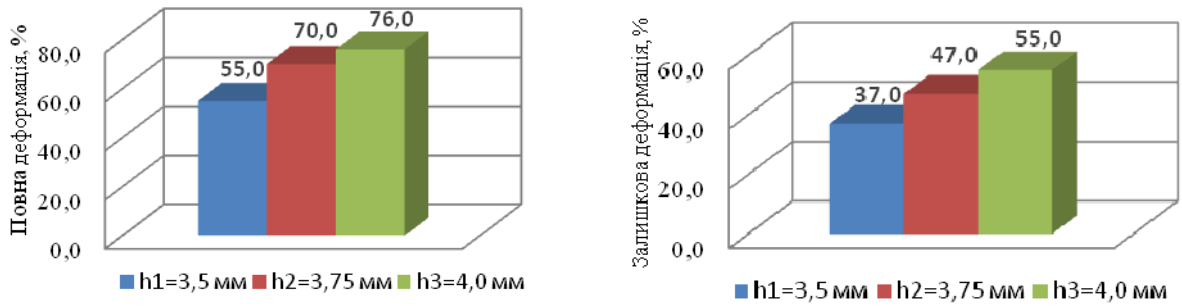


Рис. 4. Графік зміни деформації та релаксації деформації розтягу зразків трикотажу по ширині від часу

Як видно з графіків, наведених на рис. 4, збільшення рівня глибини кулірування з кроком 0,25 мм призводить до пропорційного зростання величини деформації під дією прикладеного розтягуючого зусилля та релаксації деформації після зняття навантаження. Це дає можливість прогнозувати деформаційні характеристики трикотажу підвищеної міцності у відповідності до обраної щільності його в'язання.

З метою оцінки впливу зміни глибини кулірування на величину повної та залишкової деформації побудовані відповідні діаграми (рис. 5).



а) б)

Рис. 5. Величина повної (а) та залишкової (б) деформації дослідних зразків трикотажу

Як видно з діаграми (рис. 5, а), зі збільшенням глибини кулірування на 14,28% величина повної деформації зростає на 38,2%. Слід також зауважити, що суттєвий стрибок спостерігається у діапазоні глибини кулірування від 3,5 мм до 3,75 мм. Подальше збільшення довжини нитки в петлі у меншій мірі впливає на величину повної деформації. Що стосується величини залишкової деформації, то найменша її частка спостерігається при максимальній щільності в'язання (h1 = 3,5 мм). Зменшення щільності в'язання на

14,28% призводить до зростання величини залишкової деформації на 48,6%. Спостерігається пропорційний характер зміни величини залишкової деформації під впливом зміни глибини кулірування з кроком 0,25 мм. Значна частка залишкової деформації обумовлена використанням надміцної поліетиленової нитки, яка має гладку поверхню та низький рівень пружності та жорсткості на згин.

Отримані дані свідчать про те, що зі збільшенням глибини кулірування частка залишкової деформації зростає, що можна пояснити зменшенням щільності в'язання та проявом механічних властивостей поліетиленової нитки. Значне тертя нитки об нитку мінімізує величину швидкооборотної деформації, яка у випадку використання традиційних для трикотажної галузі видів сировини є найбільшою складовою релаксації деформації. Це у більшій мірі проявляється в діапазоні глибини кулірування 3,75 ÷ 4,0. Дану властивість слід враховувати під час проектування петельної структури захисних виробів. Більшу частку залишкової деформації вздовж петельних стовпчиків (0,67 – 0,72) також можна пояснити значно більшим ступенем орієнтації петель в структурі кулірного трикотажу у поздовжньому напрямку.

Висновки

Встановлено, що збільшення рівня глибини кулірування призводить до пропорційного зростання величини деформації під дією прикладеного розтягуючого зусилля та релаксації деформації після зняття навантаження. Це дає можливість прогнозувати деформаційні характеристики трикотажу підвищеної міцності у відповідності до обраної щільності його в'язання. Оптимальних показників деформаційних характеристик трикотажу запропонованої структури досягнуто при мінімальному рівні глибини кулірування (h1 = 3,5 мм). Трикотаж можна рекомендувати для виготовлення суцільнов'язаних виробів малого діаметру і використовувати їх для захисту рук від різних механічних ушкоджень.

Література

1. Загальні вимоги до рукавиць : ДСТУ EN 420-2001. – [Чинний від 2003-01-07]. – К. : Державний комітет України з питань технічного регулювання та споживчої політики, 2003. – 18 с. – (Національний стандарт України).

2. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Одежда специальная защитная, средства индивидуальной защиты ног и рук. Классификация : Межгосударственный стандарт – ГОСТ 12.4.103-83. – [Чинний від 1984-01-07]. – М. : Изд-во стандартов, 2003. – 9 с.

3. Dianat I., Haslegrave C., Stedmon A. Design options for improving protective gloves for industrial assembly work / I. Dianat, C. Haslegrave, A. Stedmon // Applied Ergonomics. – 2014. – Volume 45, Issue 4. – P. 1208–1217.

4. Макаров А.Г. Разработка методики проведения сравнительного анализа деформационных и релаксационных свойств арамидных нитей и текстильных материалов на их основе / А.Г. Макаров, Н.В. Переборова, В.И. Вагнер, Е.К. Васильева // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2015. – № 5 (359). – С. 48–58.

5. Боброва С.Ю. Розробка трикотажу для захисту рук від механічних небезпек / С.Ю. Боброва // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. – 2018. – № 5(265). – С. 242–246.

6. Офіційний сайт компанії «Beijing Tongyizhong» [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://www.bjtyz.com/en/index.php?optionid=681&auto_id=5.

7. Полотна трикотажные. Метод определения разрывных характеристик и растяжимости при нагрузках меньше разрывных : ГОСТ 8847-85. – [Чинний від 1987-01-01]. – М. : Изд-во стандартов, 1985. – 12 с.

References

1. Zahalni vymohy do rukavyts : DSTU EN 420-2001. – [Chynnyi vid 2003-01-07]. – K. : Derzhavnyi komitet Ukrainy z pytan tekhnichnoho rehuliuvannia ta spozhyvchoi polityky, 2003. – 18 s. – (Natsionalnyi standart Ukrainy).

2. Sistema standartov bezopasnosti truda (SSBT). Odezhda special'naja zashhitnaja, sredstva individual'noj zashhity nog i ruk. Klassifikacija : Mezhgosudarstvennyj standart – GOST 12.4.103-83. – [Chinnij vid 1984-01-07]. – M. : Izd-vo standartov, 2003. – 9 s..

3. Dianat I., Haslegrave C., Stedmon A. Design options for improving protective gloves for industrial assembly work / I. Dianat, C. Haslegrave, A. Stedmon // Applied Ergonomics. – 2014. – Volume 45, Issue 4. – P. 1208–1217.

4. Makarov A.G. Razrabotka metodiki provedenija sravnitel'nogo analiza deformacionnyh i relaksacionnyh svojstv aramidnyh nitej i tekstil'nyh materialov na ih osnove / A.G. Makarov, N.V. Pereborova, V.I. Vagner, E.K. Vasil'eva // Izv. vuzov. Tehnologija tekstil'noj promyshlennosti. – 2015. – № 5 (359). – S. 48–58.

5. Bobrova S.Iu. Rozrobka trykotazhu dlia zakhystu ruk vid mekhanichnykh nebezpek / S.Iu. Bobrova // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2018. – № 5(265). – S. 242–246.

6. Ofitsiinyi sait kompanii «Beijing Tongyizhong» [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : http://www.bjtyz.com/en/index.php?optionid=681&auto_id=5.

7. Polotna trikotazhnye. Metod opredelenija razryvnyh harakteristik i rastjazhimosti pri nagruzkah men'she razryvnyh : GOST 8847-85. – Chinnij vid 1987-01-01]. – M. : Izd-vo standartov, 1985. – 12 s.

Рецензія/Peer review : 10.01.2019 р. Надрукована/Printed :15.2.2019 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Кизимчук О.П.

DOI 10.31891/2307-5732-2019-269-1-100-104
УДК 620.22:677

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

ВИКОРИСТАННЯ ДЕЯКИХ ПОЛІФУНКЦІОНАЛЬНИХ ОБРОБНИХ ПРЕПАРАТІВ ДЛЯ ЗАХИСТУ ТЕКСТИЛЬНИХ ЦЕЛЮЛОЗОВМІСНИХ МАТЕРІАЛІВ ВІД МІКРОБІОЛОГІЧНИХ ПОШКОДЖЕНЬ

Узагальнення літературних джерел [1–3] і результатів власних досліджень за останні роки [4–7] дозволило обґрунтувати можливість і доцільність використання для захисту текстильних матеріалів від мікробіологічних пошкоджень деяких поліфункціональних кремнійорганічних, фторорганічних та карбамольних обробних препаратів та доповнити ними асортимент традиційних біоцидних і фунгіцидних препаратів. При цьому ми обмежилися тільки дослідженням впливу целюлозоруйнуючих і патогенних для людини мікроорганізмів на біодеструкцію та безпечність текстильних целюлозовмісних матеріалів і виробів різного цільового призначення та способів виробництва.

Ключові слова: патогенні для людини мікроорганізми, целюлозоруйнуючі мікроорганізми, способи захисту від пошкодження текстилю мікроорганізмами, текстильна сировина, біостійкість, водоопірність, водопоглинання, біоцидні препарати, фунгіцидні препарати.

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

USE OF SOME POLYFUNCTIONAL PROTECTIVE PREPARATIONS FOR PROTECTION THE TEXTILE CELLULOSE-BASED MATERIALS FROM MICROBIOLOGICAL DAMAGES

The generalization of literary sources and the results of own researches in recent years has allowed to substantiate the possibility and expediency of the use of certain polyfunctional organosilicon drugs, a range of traditional biocidal and fungicidal drugs. At the same time, we confined ourselves to researching the influence of cellulose-destroying and pathogenic microorganisms on human biodegradation and the safety of textile cellulosic materials and products of various intended uses and methods of production. Surface modification of textile cellulosic materials various target uses of the selected types of polyfunctional organosilicon, organophosphorus and biocidal preparations allows: essentially expand and increase the assortment and properties of these materials; more rational use of the available resources of domestic textile raw materials in the country; to substantially improve the quality, safety and competitiveness of domestic textile products; to guarantee a more rational use of the existing in the country of cellulosic textile raw materials (especially flax).

Keywords: pathogenic microorganisms, cellulose-destroying microorganisms, methods of protection against tissue damage by microorganisms, textile raw materials, biodegradability, water resistance, water absorption, biocidal preparations, fungicidal preparations.

Постановка проблеми у загальному вигляді

Як відомо, проблемами формування та оцінювання біостійкості текстильних матеріалів і виробів різного цільового призначення в останні десятиріччя займалися в Україні І.С. Галик, М.М. Діанич, Р.М. Паращук, Б.Д. Семак, О.П. Сумська та інші; в Російській федерації – Б.В. Бочаров, А.Д. Вірник, М.В. Горленко, І.О. Єрмілова, В.Д. Іллічов, Л.І. Кіркіна, В.І. Кокошинська, А.Н. Неверов, О.Л. Пехташева.

Доцільність широкого використання антимікробних поліфункціональних препаратів самостійно чи в поєднанні з традиційними біоцидними препаратами для захисту текстилю від волокно-руйнуючих і патогенних для людини мікроорганізмів обумовлена низкою причин. Назвемо основні з них [5–7]:

- більш широке використання антимікробних поліфункціональних препаратів для забезпечення необхідної екологічної безпечності текстильним матеріалам і виробам різних способів виробництва, отриманих із целюлозовмісної текстильної сировини;
- мінімізувати біопошкодження целюлозоруйнуючими мікроорганізмами тих видів текстильних целюлозовмісних матеріалів і виробів, експлуатація яких відбувається за високої відносної вологості та температури (в субтропічних та тропічних умовах);
- оптимізація впливу патогенних для людини мікроорганізмів у білизняних, одягових, інтер'єрних, медичних текстильних целюлозовмісних матеріалах і виробах, використання для їх поверхневої модифікації поліфункціональних силіконових препаратів.

Деталізуємо напрями цих досліджень на прикладі розгляду окремих робіт.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Слід відзначити, що над пошуком ефективних шляхів захисту текстилю від біодеструкції мікроорганізмами займались різні автори [1, 2, 3, 10]. Для прикладу конкретизуємо деякі з цих досліджень.

Авторами роботи [2] дана сучасна класифікація біоцидних препаратів текстильного призначення (табл. 1), а також обґрунтована можливість розширення їх асортименту в результаті використання нано-, біо- та хімічних технологій.

Таблиця 1

Класифікація біоцидних препаратів текстильного призначення

№ з/п	Тип препарату	Сфери застосування препарату
1	Ртутьорганічні сполуки	Обробка технічних текстильних матеріалів (гриби, бактерії)
2	Мідьвмісні сполуки	Обробка технічних текстильних матеріалів (широкий спектр дії)
3	Олово-органічні сполуки	Обробка технічних текстильних матеріалів, як консерванти (широкий спектр дії)
4	Цинк-органічні сполуки	Захист від біопошкоджень бавовни (бактерії, гриби)
5	Солі срібла	Обробка медичних текстильних матеріалів (широкий спектр дії)
6	Фторвмісні сполуки	Обробка повсті, вовни, технічних тканин (гриби)
7	Хромати	Обробка технічних текстильних матеріалів (гриби, бактерії)
8	Похідні ундециленової кислоти	Фунгіцидна обробка текстильних матеріалів (гриби, бактерії, віруси)
9	Четвертинні амонієві солі	Гігієнічна обробка текстильних матеріалів (гриби, бактерії, віруси)
10	Амфотерні поверхнево-активні речовини	Гігієнічна обробка текстильних матеріалів (широкий спектр дії)
11	Похідні гуанідину	Антимікробна обробка текстильних матеріалів (широкий спектр дії)
12	Похідні сечовини	Надання бактеріостатичних властивостей віскозним волокнам
13	Саліциланілід	Антимікробна обробка текстильних матеріалів (гриби)
14	Похідні фенолу	Обробка технічних текстильних матеріалів (бактерії, гриби)
15	Дитіокарбамати	Обробка технічних текстильних матеріалів (гриби)
16	2-меркаптобензотіазол	Фунгіцидна обробка целюлозних волокон (гриби, бактерії, віруси)
17	8-гідроксихінолін	Фунгіцидна обробка волокон (гриби, бактерії, віруси)
18	Нафтенати	Обробка текстильних волокон (гриби, бактерії)

Авторами роботи [3] сформульовані такі основні вимоги для антимікробних препаратів, які використовуються для захисту текстильних волокон, матеріалів і виробів різного цільового призначення:

- вони повинні ефективно захищати широкий асортимент текстилю від біодеструкції різноманітними волокно-руйнуючими мікроорганізмами при мінімальній концентрації цих препаратів;
- ці препарати повинні бути безпечними для людини в процесі їх використання;
- вони не повинні негативно впливати на інші властивості текстильних матеріалів (механічні, фізичні, естетичні та інші);
- вони повинні бути екологічними та зручними у використанні;
- легко поєднуватися з іншими обробними препаратами;
- повинні мати високу світлостійкість і атмосферостійкість.

Відзначається, що оброблення текстильних матеріалів біоцид ними препаратами може відбуватися шляхом їх просочування розчинами названих препаратів; хімічної та фізичної поверхневої модифікації цими препаратами; введенням цих препаратів у прядильні розчини при отриманні хімічних волокон, або у зв'язуючі речовини при отримані нетканих полотен.

Авторами роботи [4] вивчена можливість та обґрунтована доцільність використання деяких кремнійорганічних, фторорганічних, карбомольних та інших видів препаратів для поліфункціонального оброблення ними текстильних целюлозовмісних матеріалів різного цільового призначення.

Дана порівняльна характеристика властивостей поліфункціональних традиційних біоцидних препаратів текстильного призначення (катамін АБ, метацид, АПБ-40 та інших). Вивчена сумісність багатьох видів поліфункціональних і традиційних біоцидних препаратів.

Досліджені основні чинники (світлопогода, вологість, температура), які визначають довговічність ефектів, отриманих на основі поліфункціональних, біоцидних препаратів і їх сумішей. Обґрунтована доцільність продовжити та поглибити товарознавчі аспекти цих досліджень.

Авторами роботи [8] розроблено нові типи антимікробних обробних препаратів широкого спектру дії, включаючи і захист текстильних целюлозовмісних матеріалів і виробів. Це такі препарати: ЕТС – етилметилсилоксан, МТС – метилтіосульфанат і АТС – алілтіосульфанат. При цьому обґрунтовані рецептурно-технологічні режими використання названих типів обробних препаратів. Дана характеристика властивостей цих препаратів та обґрунтування сфер їх використання.

Формулювання цілей статті

На основі узагальнення літературних даних і результатів власних досліджень обґрунтувати можливість та доцільність широкого використання деяких поліфункціональних кремнійорганічних, фторорганічних і карбамольних препаратів для надання текстильним матеріалам одночасно декілька

корисних властивостей (біостійкості, водоопірності, атмосферостійкості, формостійкості, екологічної безпечності та інших), використовуючи при цьому поліфункціональні препарати самостійно або сумісно із традиційними біоцидними препаратами (метацидом, катаміном АБ, АБП-40 та іншими).

Виклад основного матеріалу дослідження

Об'єктами експериментальних досліджень при вирішенні поставлених завдань служили:

- бавовняні плащові та курткові тканини, поверхнево модифіковані деякими поліфункціональними обробними препаратами і хромоланом (еталонний препарат);
- бавовняні білизняні тканини (бязі), поверхнево модифіковані деякими біоцидними та силіконовими препаратами;
- лляне сорочково-платтяне полотно, поверхнево модифіковане різними видами силіконових препаратів.

Результати впливу силіконової обробки плащової бавовняної тканини на її біостійкість та водоопірність надано в таблицях 2, 3, а результати впливу силіконової обробки на біостійкість лляної тканини, подано в таблиці 4.

Таблиця 2

Вплив силіконової обробки плащової бавовняної тканини на її біостійкість та водоопірність

№ рецепту	Склад просочувальної ванни	Концентрація препарату, г/л	Чисельність целюлозо-руйнуючих мікроорганізмів, тис/1г абсолютно сухої тканини			Водопоглинання, %	Водоопірність, Па
			грибів	бактерій	разом		
1	Дистильована вода	-	3,45	2,10	5,55	67,7	0
2	ГКР-10–30-відсотковий водно-спиртовий розчин алкілсиліконату натрію	100	0,80	0,40	1,20	43,2	2805
3	ГКР-94–50-відсоткова толуольна емульсія поліетилгідросилоксану Каталізатор препарат АГМ-3	60 1,5	1,05	0,42	1,47	32,5	3158
4	ПІНЗ–35-відсоткова толуольна емульсія поліізононілсілсеквіазану Каталізатор $Al(NO_3)_3$	60 7,0	2,50	1,20	3,70	60,5	2442
5	Хромолан (еталон)* Каталізатор уротропін	50 30	2,75	1,12	3,87	38,2	2629

*Примітка. *Хромолан (хромстеарилхлорид) – розчин хромової комплексної солі стеаринової кислоти в ізопропіловому спирті. За зовнішнім виглядом це темно-зелена малов'язка рідина з специфічним запахом ізопропілового спирту.*

Таблиця 3

Вплив виду обробки на біостійкість бавовняної тканини (бязь)

№ рецепту	Назви препаратів	Концентрація препарату у ванні, г/л	Коефіцієнт біостійкості (К,%) після контакту з ґрунтовими мікроорганізмами, дні			Водопоглинання, %
			3	5	10	
1	Дистильована вода	-	56,8	28,4	11,7	30,8
2	Катамін А Б	10	95,8	81,6	40,3	22,0
3	Метацид	20	91,3	42,4	28,3	20,5
4	АБП-40*	20	96,5	90,3	75,4	22,4
5	Хромолан	70	60,9	15,5	12,9	15,2
6	ГКР-10	30	71,4	16,9	14,3	15,3
7	АМСР**	30	67,7	30,8	13,0	20,8
8	КЕ-119-215***	30	31,7	30,5	18,1	9,5
9	Катамін АБ КЕ-119-215	10 30	89,3	87,2	46,5	12,9
10	Метацид КЕ-119-215	10 30	64,0	52,9	34,7	12,0
11	АБП-40 КЕ-119-215	20 30	85,8	82,3	79,7	10,3

*Примітки: *Препарат АБП-40 – це латексний біоцид, отриманий в результаті сополімеризації трибутилоловометакрилату з бутилакрилатом;*
***30% розчин алюмометилсиліконату натрію;*
****50% емульсія метилгідридсилоксану з невеликим вмістом активних груп.*

Як видно з аналізу даних табл. 2, серед обраних нами силіконових препаратів (ГКР-10, ГКР-94 і ПІНЗ) найбільш виправданим для надання плащовій бавовняній тканині необхідного ефекту біостійкості та

водоопірності виявився препарат ГКР-10 (рец. 2). За названими показниками досліджувана плащова тканина суттєво відрізняється від обробленої хромоланом (еталонної тканини).

У табл. 3 дана порівняльна характеристика біостійкості бязі, обробленої деякими видами біоцидних і силіконових препаратів. При цьому встановлено, що:

- серед обраних біоцидних препаратів найбільш ефективними для захисту від біопошкодження ґрунтовими мікроорганізмами виявився препарат АБП-40;
- застосування для обробки бязі силіконових препаратів (рец. 6, 7, 8) виявились виправданим тільки для короткострокового захисту від ґрунтових мікроорганізмів (три доби).

Таблиця 4

Вплив силіконової обробки на біостійкість лляної тканини

№ рецепту	Обробний препарат		Кон-цен-трація препа-рату у ванні, г/л	Ступінь розкладання тканини під дією мікроорганізмів, %				
	марка	склад		внутрішньої мікрофлори в культураль-ній рідині	ґрунтових мікроорганіз-мів, якими заражена культуральна рідина	Fomi-topsis onesse	Bac. Pratey	Bac. Sub-tilis
1	-	Дистильована вода	-	83,5	74,5	90,1	86,6	87,2
2	АМСР-3	30-відсотковий розчин алюмометилсиліконату натрію	150	27,7	47,0	28,8	34,8	35,0
3	ГКР-94	50-відсотковий толуольний розчин поліетилгідро-силоксану	50	55,7	58,7	46,8	46,8	45,9
4	КЕ-43-22	40-відсоткова емульсія поліфенілсиліоксанолу і поліетилгідросилоксану	100	35,9	61,8	34,3	50,7	52,2
5	КЕ-42-20	42-відсоткова емульсія поліфенілсилоксанолу і поліетилсилоксанолу	115	40,6	63,7	35,8	51,5	53,5
6	МБ-1	50-відсоткова толуольна емульсія поліметилбу-токсисилоксанолу	100	56,4	74,4	86,5	82,1	83,0
7	МБ-2	50-відсоткова толуольна емульсія поліметилди-бутоксисилоксанолу	100	44,7	68,7	89,0	70,0	78,0

Як видно з даних табл. 4, серед 6-и обраних нами силіконових препаратів найбільш високий антимікробний ефект на лляній тканині досягається після оброблення препаратом АМСР-3 (рец. 2). Оправданим виявилося також оброблення цієї тканини за рец. 4 і рец. 5. При цьому кращі результати отримані при пригніченні росту названими препаратами мікроорганізмів, які містяться на самій лляній тканині.

Висновки

Аналіз даних табл. 2–4 дозволяє зробити наступні узагальнюючі висновки та пропозиції:

1. Поверхнева модифікація текстильних целюлозовмісних матеріалів різного цільового призначення обраними видами поліфункціональних кремнійорганічних, фторорганічних і біоцидних препаратів дозволяє:

- суттєво розширити та збільшити асортимент та властивостей цих матеріалів;
- більш раціонально використати наявні в країні ресурси вітчизняної текстильної сировини;
- суттєво підвищити якість, безпечність і конкурентоздатність вітчизняної текстильної продукції;
- гарантувати більш раціональне використання наявної в країні целюлозовмісної текстильної сировини (особливо льону).

2. Доцільно поглибити товарознавчі та матеріалознавчі дослідження асортименту і властивостей текстильних матеріалів, поверхнево-модифікованих поліфункціональними препаратами різного хімічного складу. Для цього розширити асортимент та сфери застосування цих матеріалів в різних підгалузях текстильного виробництва. Охопити більш широку різновидність волокно-руйнуючих і патогенних для людини мікроорганізмів різних фізіологічних груп, родів і видів.

3. Назріла нагальна потреба підготовки і видання окремого міжгалузевого довідника «Текстильні поліфункціональні обробні препарати» для потреб фахівців легкої промисловості та торгівлі України, в якому містилася б сучасна інформація про:

- способи виробництва, хімічний склад, властивості та сфери застосування різних видів обробних поліфункціональних препаратів;
- їх переваги і недоліки порівняно з традиційними біоцидними препаратами текстильного призначення;
- пошук і характеристика властивостей тих видів антимікробних обробних препаратів, які найбільш потрібні для захисту матеріалів від патогенних для людини мікроорганізмів.

4. Як свідчить зарубіжний досвід підготовки студентів товарознавчого профілю [9] існує потреба

створення вітчизняного підручника подібного типу «Способи захисту текстилю від пошкодження мікроорганізмами».

5. Судячи з аналізу літературних даних [3, 8–10], окрім названих поліфункціоналних препаратів, на хімічних підприємствах розробляються також нові типи традиційних біоцидних препаратів текстильного призначення, які успішно використовуються для захисту текстилю від дії волокно-руйнуючих мікроорганізмів.

6. Висока вагомість мікробіологічної деструкції текстильних матеріалів і виробів у їх загальному зносі (за підрахунками фахівців вона становить 50%), недостатнє вивчення механізму пошкодження мікроорганізмами текстилю різного цільового призначення, обмеженість асортименту ефективних обробних препаратів для його захисту від мікробіологічних пошкоджень свідчить про доцільність поглиблених мікробіологічних досліджень текстилю і пошук ефективних засобів захисту від його мікробіологічної деструкції не тільки у спеціалізованих мікробіологічних академічних інститутах, але й в університетах сфери легкої промисловості та торгівлі України.

Література

1. Ильичев В.Д. Экологические основы защиты от биоповреждений / В.Д. Ильичев, Б.В. Бочаров, М.В. Горленко. – М. : Наука, 1985. – 264 с.

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. Пехташева Е. Л. Биостойкость натуральных и синтетических волокон / Е.Л. Пехташева, А.Н. Неверов, Г.Е. Заиков, С.Ю. Софьина, О.В. Стоянов // Вестник Казанского технического университета. – 2012. – Т. 15, № 7. – С. 292–305.

4. Галик І.С. Екологічна безпека та біостійкість текстильних матеріалів / І.С. Галик, О.Б. Концевич, Б.Д. Семак. – Львів : Видавництво ЛКА, 2006. – 232 с.

5. Галик І.С. Роль біостійкості текстилю у формуванні його екологічної безпечності / І.С. Галик, Б.Д. Семак // Вестник Херсонского национального технического университета. – 2014. – № 1(18). – С. 118–122.

6. Галик І.С. Пошук ефективних способів захисту текстилю від дії шкідливих мікроорганізмів / І.С. Галик, Б.Д. Семак, З.М. Семак //Вісник Львівської комерційної академії. Серія товарознавча. – 2014. – Випуск 14. – С. 6–10.

7. 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.

8. Швець В.В. Антимікробна активність композицій на основі тіосульфатів і біогенних поверхнево-активних речовин щодо фітопатогенів // В.В. Швець, О.В. Карпенко, І.В. Карпенко, В.П. Новіков, В.І. Лубенець // Проблеми біології та біотехнології. Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2017. – № 3. – С. 89–94.

9. Пехташева Е.Л. Биоповреждения непродовольственных товаров : учебник / под ред. А. Н. Неверова. – 2-е издание, прераб. и доп. – М. : Дашков и К, 2015. – 332 с.

10. Пахолюк О.В. Вплив біоцидного оброблення целюлозовмісних текстильних матеріалів на зміну їх властивостей / І.А. Мартиросян, О.В. Пахолюк, В.І. Лубенець // Вісник Хмельницького національного університету. – 2018. – № 6. – С. 94–98.

References

1. Il'ichev V.D. Jekologicheskie osnovy zashhity ot biopovrezhdenij / V.D. Il'ichev, B.V. Bocharov, M.V. Gorlenko. – M. : Nauka, 1985. – 264 s.

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

3. Pehtasheva E. L. Biostojkost' natural'nyh i sinteticheskih volokon / E.L. Pehtasheva, A.N. Neverov, G.E. Zaikov, S.Ju. Sof'ina, O.V. Stojanov // Vestnik Kazanskogo tehnicheskogo universiteta. – 2012. – T. 15, № 7. – S. 292–305.

4. Halyk I.S. Ekolohichna bezpeka ta biostiikist tekstylnykh materialiv / I.S. Halyk, O.B. Kontsevych, B.D. Semak. – Lviv : Vydavnytstvo LKA, 2006. – 232 s.

5. Halyk I.S. Rol biostiikosti tekstyliu u formuvanni yoho ekolohichnoi bezpechnosti / I.S. Halyk, B.D. Semak // Vestnyk Khersonskoho natsyonalnoho tekhnycheskoho unyversyteta. – 2014. – № 1(18). – S. 118–122.

6. Halyk I.S. Poshuk efektyvnykh sposobiv zakhystu tekstyliu vid dii shkidlyvykh mikroorhanizmiv / I.S. Halyk, B.D. Semak, Z.M. Semak //Visnyk Lvivskoi komertsiinoi akademii. Seriia tovaroznavcha. – 2014. – Vypusk 14. – S. 6–10.

7. 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.

8. Shvets V.V. Antymikrobna aktyvnist kompozytsii na osnovi tiosulfativ i biohennykh poverkhnevo-aktyvnykh rechovyn shchodo fitopatoheniv // V.V. Shvets, O.V. Karpenko, I.V. Karpenko, V.P. Novikov, V.I. Lubenets // Problemy biolohii ta biotekhnolohii. Naukovi visti NTUU «KPI». – 2017. – № 3. – S. 89–94.

9. Pehtasheva E.L. Biopovrezhdenija neprodovol'stvennyh tovarov : uchebnik / pod red. A. N. Neverova. – 2-e izdanie, prerab. i dop. – M. : Dashkov i K, 2015. – 332 s.

10. Pakholiuk O.V. Vplyv biotsydnoho obroblennia tseliulozovmisnykh tekstylnykh materialiv na zminu yikh vlastyvostei / I.A. Martyrosian, O.V. Pakholiuk, V.I. Lubenets // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2018. – № 6. – S. 94–98.

Рецензія/Peer review : 7.11.2018 р. Надрукована/Printed :15.2.2019 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Байдакова Л.І.

DOI 10.31891/2307-5732-2019-269-1-105-113
УДК 303.714:666.51

О.В. КАЛАШНИК, С. Е. МОРОЗ
Полтавська державна аграрна академія
Л.В. ПОЛІЩУК, О. В. КИРИЧЕНКО
Вищий навчальний заклад укоопспілки «полтавський університет економіки і торгівлі»

ПОРІВНЯЛЬНЕ ТЕСТУВАННЯ ФАРФОРОВОГО ПОСУДУ

У роботі розглядається процес проведення порівняльного тестування фарфорового посуду за певним алгоритмом. Як об'єкт дослідження були обрані тарілки фарфорові пиріжкові різних виробників, що представлені на ринку м. Полтава. Для проведення порівняльного тестування фарфорового посуду авторами розроблено оптимальну номенклатуру показників якості, складено програму порівняльного тестування; проведено органолептичне оцінювання властивостей та лабораторне дослідження обраних показників якості; проаналізовано результати порівняльного тестування.

Ключові слова: фарфоровий посуд, порівняльне тестування, реквізити маркування, основні розміри, водопоглинання, термостійкість, білість.

O.V. KALASHNYK, S.E. MOROZ
Poltava State Agrarian Academy
L.V. POLISCHYK, O.V. KYRYCHENKO
Poltava University of Economics and Trade

COMPARATIVE TESTING OF PORCELAIN DISHES

Comparative testing of goods is the most effective mechanism for informing consumers. This article examines of comparative testing of porcelain dishes by a certain algorithm. The object of the research is the plates of porcelain for patties of various manufacturers, presented on the market of Poltava. For the comparative testing developed indicators of quality plates of porcelain for patties. The program of tests: an analysis of the requisites of marking; identification of objects; definition of the main dimensions; water absorption, heat resistance and whiteness; evaluation of indicators and analysis of results. The marking of samples 1 and 2 do not meet the requirements of regulatory documentation. On the surface of the sample 3 revealed defects of appearance (clogging). The results of the determination of thermal stability show that the plates have a durable, predicted lifetime of samples over 2.5 years. The indicator of water absorption of samples lies in the range from 0.1 to 0.2, the whiteness index is 66.0, 67.0 and 94.0%. These indicators meet the requirements of normative documentation. Investigation of the microstructure of the fracture fragment of products was performed with the USB Digital Microscope with an increase of 5x to 500x. The microstructure of products is homogeneous, dense and glassy. On the breaks of samples expressed layers of colorless, transparent glaze, white color. Indicators used for comparative testing evaluated on a scale. Samples of plates of English and Chinese manufacturers had high evaluation. The comparative testing show that sample 1 scored 4.7 points («excellent»); sample 2 – 4.7 («excellent»); sample 3 – 4.4 («good»). The decrease in the evaluation is due to the incomplete amount of the requisites of marking on the samples. There is a problem to provide complete information about goods to consumers.

Keywords: porcelain dishes, comparative testing, requisites of marking, main dimensions, water absorption, heat resistance, whiteness.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. Якість товару характеризується показниками, тобто кількісними характеристиками однієї або декількох властивостей певного товару. У зв'язку з цим, вирішення проблеми формування номенклатури показників якості виробів, згідно з вимогами прийнятих нормативних документів і з врахуванням потреб потенційних споживачів, є нагальним завданням, для вирішення якого необхідний системний та комплексний підхід. Показники якості товару необхідно обирати із повного переліку показників споживних властивостей, виходячи із ступеня впливу певних властивостей на здатність виробу задовольняти потреби. Тому актуальним завданням є формування та розробка номенклатури показників якості товарів за певних умов експлуатації з урахуванням сукупності характеристик, які визначають ступінь здатності задовольняти встановлені або передбачувані потреби, і визначаються кількісними характеристиками однієї або декількох властивостей.

Аналіз останніх досліджень чи публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми і на які спирається автор. До числа найбільш ефективних механізмів інформування споживачів, що склалися в міжнародному та європейському співтоваристві, відноситься порівняльне тестування товарів та послуг, що пропонуються споживчим ринком [1]. Порівняльне тестування як процес науковцями трактується по-різному (табл. 1).

Таким чином, аналізуючи різні трактування та підходи до визначення можна узагальнити проаналізовану інформацію і визначити наступні загальні риси порівняльного тестування:

- це дослідження, випробування, оцінювання;
- об'єктом є аналогічна продукція, товар з аналогічними властивостями, одного призначення, але різних марок і виробників;
- окреслюється мета дослідження – накопичення та надання необхідної інформації, освітнього матеріалу споживачам і зацікавленим суб'єктам ринку.

Таблиця 1

Визначення терміну «порівняльне тестування»

Автор, джерело	Визначення
Концепція розвитку в Україні незалежного порівняльного тестування товарів та послуг для споживачів [2, 3]	дослідження групи товарів з аналогічними властивостями, але різних марок і виготовлювачів, здійснюване з метою створення освітнього матеріалу для споживачів
Безрукий В. [4]	випробування аналогічної продукції різних виробників, мета якого надати споживачеві необхідну незалежну інформацію про товари і послуги на ринку
Поліщук Л. В., Кириченко О. В. [5]	оцінювання товарів з аналогічними властивостями, послуг на основі об'єктивних свідчень, опитувань, випробовувань (лабораторних, практичних), вимірювань, демонстрацій, дослідного носіння, дегустацій і з метою накопичення та надання необхідної інформації споживачам та зацікавленим суб'єктам ринку
Мартосенко М. Г., Браїлко А. С. [6]	незалежна оцінка товарів одного призначення, але різних марок і виробників, на основі об'єктивних свідчень, опитувань, випробувань, вимірювань, демонстрацій, дослідної експлуатації, дегустацій з метою надання необхідної інформації споживачам і зацікавленим суб'єктам ринку

Формулювання цілей статті (постановка завдання). Метою роботи є проведення порівняльного тестування фарфорового посуду, а саме тарілок фарфорових пиріжкових. Для досягнення поставленої мети потрібно виконати такі завдання:

- розглянути теоретичні аспекти порівняльного тестування;
- провести порівняльне тестування фарфорового посуду за якісними характеристиками, для цього розробити оптимальну номенклатуру показників якості для проведення тестування тарілок фарфорових пиріжкових, скласти програму порівняльного тестування; провести органолептичне оцінювання властивостей та лабораторне дослідження обраних показників якості; проаналізувати результати порівняльного тестування.

Виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів. Для проведення експертного дослідження потрібно обрати оптимальну номенклатуру показників якості. Тому, відповідно до ГОСТ 23554.1–79 [7] експертне оцінювання включало виконання наступних етапів:

- підготовчого;
- роботи робочої групи;
- роботи експертної групи;
- заключного.

Кількість експертів відповідно до додатку 2 ГОСТ 23554.1–79 [7] становила 7 осіб. У якості експертів виступали викладачі та магістри спеціальності «Товарознавство та експертиза в митній справі». Також на підготовчому етапі була окреслена мета – вибір оптимальної номенклатури показників якості тарілок фарфорових пиріжкових.

Для оцінювання якості продукції важливим є обґрунтований вибір показників, за допомогою яких у повній мірі можна було б встановити її здатність задовольняти встановлені вимоги та потреби споживачів. При цьому не можна упускати будь-якого важливого показника і водночас перевантажувати номенклатуру малозначущими, оскільки зі збільшенням їх кількості інструментальна оцінка якості ускладнюється технічним виконанням, а її результати можуть бути необ'єктивними.

У першу чергу обирали номенклатуру показників якості тарілок фарфорових пиріжкових опираючись на інформацію, яка міститься в нормативних документах [8, 9], аналітичних статтях [10].

Фарфоровий посуд призначений для задоволення потреб споживача в їжі та напоях, так як слугує для їх приймання, короткочасного зберігання, подачі їжі на стіл тощо. Аналізуючи процес споживання (експлуатації) фарфорового посуду, встановлено, що кожний виріб незалежно від призначення виконує такі функції:

- «приймає», зберігає їжу та напої (початкова функція);
- «віддає» їжу та напої повністю, або частково в міру необхідності (кінцева функція).

У ГОСТ 4.69-81 [11] поданий перелік показників якості фарфорового посуду та властивості, що його характеризують. Цей нормативний документ включає 17 показників, що об'єднані в 4 групи, серед яких показники призначення, ергономічні, надійності та естетичні показники (рис. 1).

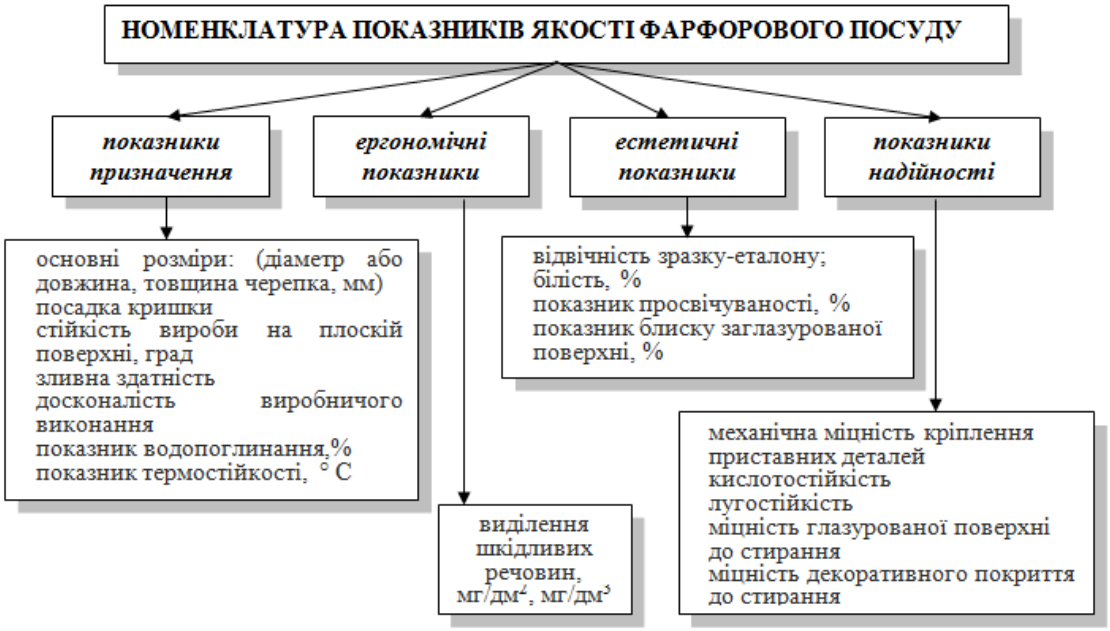


Рис. 1. Номенклатура показників якості фарфорового посуду

Цей же нормативний документ визначає можливість застосування виробів залежно від сфери їх використання. Відповідно до таблиці 2 ГОСТ 4.69-81 [11] об'єкти даного дослідження можна віднести до столового фарфорового посуду.

Окрім того, в результаті проведення підготовчого етапу була оцінена спроможність лабораторій ВНЗ Укоопспілки «Полтавський університет економіки і торгівлі» і визначені основні прилади, методи і засоби проведення досліджень.

Обрані тарілки фарфорові пиріжкові мають також певні товарознавчі ознаки (функція, яку вони виконують; форма; розміри; наявність приставних деталей). Враховуючи вище проаналізовані чинники, із переліку були виключені такі показники: посадка кришки; зливна здатність; механічна міцність кріплення приставних деталей; міцність декоративного покриття до стирання; міцність глазурованої поверхні до стирання.

Під час оцінювання якості зразків тарілок фарфорових пиріжкових у групу показників якості експертами включені 10 одиничних показників, приведених у таблиці 2. Знаком «+» відмічені показники, що включені експертами у склад групи. Отримані за формулою значення *α(a)* [7] наведені в таблиці 2.

Таблиця 2

Вибір одиничних показників якості для тестування тарілок фарфорових пиріжкових

Найменування показника	Показники, включені експертами							*α(a)*
	I	II	III	IV	V	VI	VII	
1. Основні розміри: (діаметр або довжина, товщина черепка, мм)	+	–	+	+	+	+	+	0,857
2. Стійкість виробу на плоскій поверхні, град	–	+	+	–	+	+	–	0,571
3. Досконалість виробничого виконання	+	+	+	–	+	–	+	0,714
4. Показник водопоглинання, %	+	+	+	+	–	+	+	0,857
5. Показник термостійкості, ° С	+	+	+	+	+	+	+	1,000
6. Відповідність зразку-еталону	+	–	+	+	+	–	+	0,714
7. Білість, %	+	+	+	-	+	+	+	0,857
8. Показник просвічуваності, %	–	+	–	–	–	+	+	0,429
9. Показник блиску заглазурованої поверхні, %	–	+	–	–	–	+	+	0,429
10. Виділення шкідливих речовин, мг/дм^2, мг/дм^3	+	–	+	+	+	–	+	0,714

Виходячи із вказівок, отриманих під час постановки завдання порівняльного тестування і числа експертів, робоча група прийняла для включення показників у групі критичне значення *α(a)* дорівнює $^3/_4$. Як бачимо із табл. 2, для чотирьох із десяти запропонованих показників *α(a)*≥ $^3/_4$. Таким чином, номенклатура показників якості тарілок фарфорових пиріжкових включає такі показники якості:

- основні розміри (діаметр, товщина черепка), мм;
- показник водопоглинання, %;
- показник термостійкості, °С;
- білість.

Отже, у результаті проведення аналітичного дослідження обрана номенклатура показників якості

фарфорового посуду, а саме тарілок фарфорових пиріжкових, яка була використана для проведення їх порівняльного тестування.

Сформована практика у європейських країнах порівняльного тестування товарів, призначених для споживачів, передбачає наступну структуру:

- планування досліджень;
- контакти з зацікавленими сторонами;
- рівень досліджень: місцевий;
- відбір зразків;
- оформлення документації щодо закуплених зразків;
- програма тестування;
- особливості тестування товарів.

Порівняльне тестування тарілок фарфорових пиріжкових було проведено за програмою, що включала 8 етапів (рис. 2).

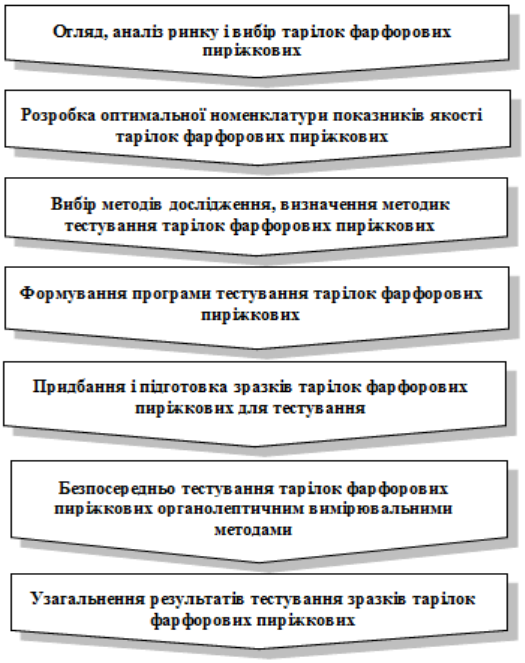


Рис. 2. Схема програми проведення порівняльного тестування

Перший крок у проведенні тестування – вибір товарів. Зразки для випробувань були придбані в торговельній мережі м. Полтава. Під час вибору зразків був виконаний ряд умов:

- порівнювати можна вироби з однаковим функціональним призначенням – усі зразки фарфорових тарілок за призначенням відносять до пиріжкових;
- обрані вироби досить широко представлені в продажу;
- діяли як звичайні споживачі, усі зразки були відібрані в однакових умовах – у торговому залі, при цьому магазин про цілі покупки не сповіщали (для недопущення до тесту товарів, спеціально підготовлених виробником).

Програма випробувань тарілок фарфорових пиріжкових складалася з етапів, що були проведені у такій послідовності:

- аналіз реквізитів маркування;
- ідентифікація об’єктів;
- визначення основних розмірів (діаметр, товщина черепка), мм;
- визначення показника водопоглинання, %;
- вимірювання показника термостійкості, °С;
- вимірювання білості;
- оцінювання показників та аналіз результатів порівняльного тестування.

Для проведення порівняльного тестування тарілок фарфорових пиріжкових необхідно визначити ряд показників, які можна виміряти лише в лабораторних умовах. Тому проведення досліджень показників властивостей відібраних зразків здійснювали в лабораторіях ВНЗ Укоопспілки «Полтавський університет економіки і торгівлі».

Під час оцінювання маркування тарілок фарфорових пиріжкових на поверхні зразка 1 було виявлено дві паперові етикетки, нанесені на лицевій та зворотній сторонах тарілки (рис. 3).

1 2

Рис. 3. Фотографічне зображення паперових етикеток, що нанесені на зразок 1: 1 – лицьова сторона; 2 – зворотна сторона

На поверхні зразка 2 було виявлено паперову етикетку, нанесену на зворотній стороні тарілки (рис. 4).

На поверхні зразка 3 не було виявлено паперових етикеток. Аналіз реквізитів маркування, що виявлені на паперових етикетках зразків 1 і 2 представлений у таблиці 3.

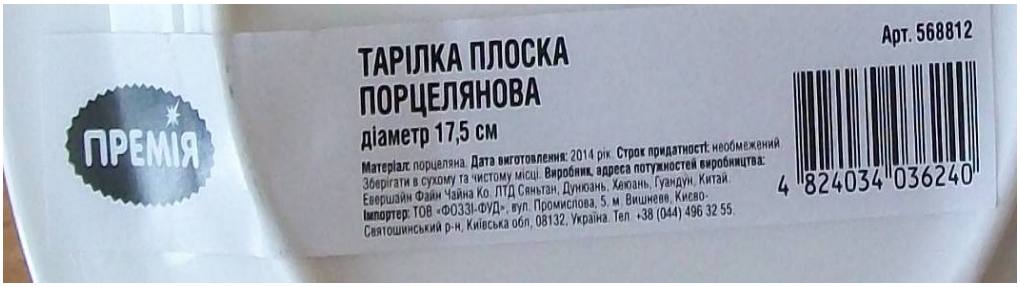


Рис. 4. Фотографічне зображення паперової етикетки, що нанесена зворотній стороні зразка 2

Таблиця 3

Аналіз реквізитів маркування, що виявлені на паперових етикетках зразків 1 і 2

Реквізити маркування	Реквізити	
	зразок 1	зразок 2
Назва виробу	Тарілка пиріжкова	Тарілка плоска
Розмір, см	15	17,5
Артикул	WL991511	568812
Сертифікат	Не підлягає сертифікації	-
Термін придатності	Необмежений	Необмежений
Умови зберігання	Не потребує особливих умов зберігання	Зберігати у сухому та чистому місці
Склад	Порцеляна	Порцеляна
Постачальник (імпортер)	ТОВ «Торговий Дім Інтер Трейлінг Плюс» 49107, м. Дніпро, аб. Гагаріна, б. 111А, т. 0563744692	ТОВ «ФОЗЗІ-ФУД», абл. Промислова, 5, м. Вишневе, Києво-Святошинський р-н, Київська обл., 08132, Україна. Тел. +38 (044) 4963255
Дата виготовлення	Листопад 2014	2014 рік
Виробник	Вілмакс Лімітед, 49 Бромлі стріт, Ландон, Е10НВ. Юнайтед Кінгдом. Вироблено в Англії	Евершайн Файн Чайна Ко ЛТД Сяньтан, Дунюань, Хеюань, Гуандун, Китай
Штриховий код	5052609910117	4824034036240

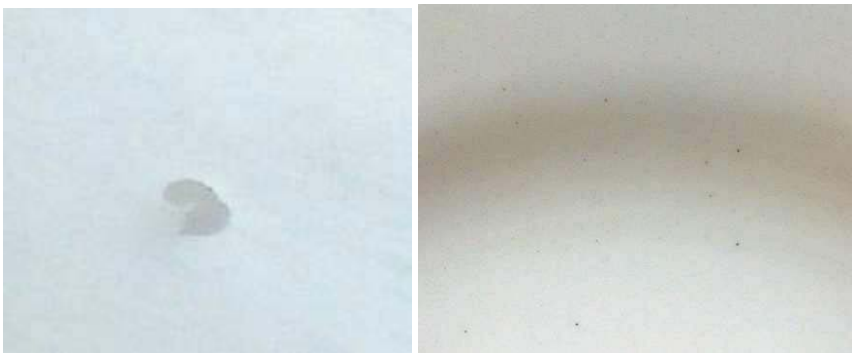
Після зняття паперових етикеток із зворотної сторони зразків 1 і 2 виявлені клейма (табл. 4). Відповідно до ГОСТ 28389-89 [12] на фарфорових виробах повинні бути нанесені позначення товарного знаку і сорту. Так, під час проведення огляду зовнішнього вигляду виробів, які подані для проведення порівняльного тестування, встановлено що за маркуванням зразки 1 та 2 не відповідають вимогам ГОСТ 28389-89 [12].

Під час огляду на поверхні зразка 3 виявлені дефекти зовнішнього вигляду (рис. 5). Засмічення – гладкі або шорсткі підвищення, утворені сторонніми включеннями, що прилипли до поверхні виробу. Відповідно до ГОСТ 28390-89 [8] засмічення допускається у виробах (табл. 4).

Таблиця 4

Аналіз реквізитів маркування, що виявлені на поверхні зразків

№ зразка	Характеристика маркування		Відповідність вимогам ГОСТ 28389-89 [12]
	відповідно до ГОСТ 28389-89 [12]	на зразках	
1	Товарний знак наносять на тильну сторону дна вироби штемпелюванням керамічної фарбою або декалькоманією з подальшим випалюванням, або контррельєфним зображенням при формуванні виробів. Сорт наносять штемпелюванням керамічної фарбою з подальшим випалюванням або «холодним» способом фарбою, стійкою до стирання, або наклейкою етикетки, виготовленої друкарським способом. Сорт наносять фарбою червоного кольору для виробів 1 сорту або зеленого кольору для виробів 2 сорту		Не відповідає
2			Не відповідає
3			Відповідає



1 2

Рис. 5. Фотографічне зображення дефектів, що виявлені на зразку 3: 1 – засмічення; 2 – мошка

Відповідно до програми порівняльного тестування тарілок фарфорових пиріжкових на початку дослідження проведено вимірювання їх діаметрів та товщини (табл. 5). Отже, відповідно до ГОСТ 28390-89 [8] зразки тарілок фарфорових пиріжкових віднесемо у групу «мілкі» з діаметром до 175 мм.

Відповідно до обраних показників якості та розробленої програми порівняльного тестування наступним етапом було проведено вимірювання термічної стійкості глазурі зразків тарілок фарфорових пиріжкових. Для вимірювання термічної стійкості глазурі використали стандартну методику [13]. Зразки виробів розміщували у сушильній шафі, нагрітій спочатку до 100ºС. Далі температуру у сушильній шафі підвищували до 110°С і витримували вироби при цій температурі протягом 10 хв. Потім їх швидко виймали із шафи щипцями з гумовими наконечниками і занурювали на 10 хв. У підфарбовану в синій колір воду кімнатної температури. Після цього виріб виймали і оглядали. Якщо після 10 хв. охолодження на виробі не з'являються сліди руйнування, тобто не утворюється цек (глазурна тріщина) або тріщина в шарі глазурі, то виріб витирали і знову ставили до шафи на 10 хв, але вже при температурі 120ºС. Послідовне підвищення температури (кожен раз на 10°С) і охолодження повторювали до тих пір, поки на глазурі не з'являться тріщини. Чим вища температура останнього нагрівання виробу, після охолодження якого з'явилися сліди руйнування, тим краща якість виробів. Таким чином, найкращій результат має зразок 2 (тарілка пиріжкова фарфорова виробництва Евершайн Файн Чайна Ко ЛТД Сяньтан, Дунюань, Хеюань, Гуандун, Китай).

Температура появи цеку на виробах під час випробування на термостійкість визначає довговічність їх служби (табл. 5).

Таблиця 5

Строк служби фарфорових виробів залежно від температури нагрівання, що викликає цек [14]

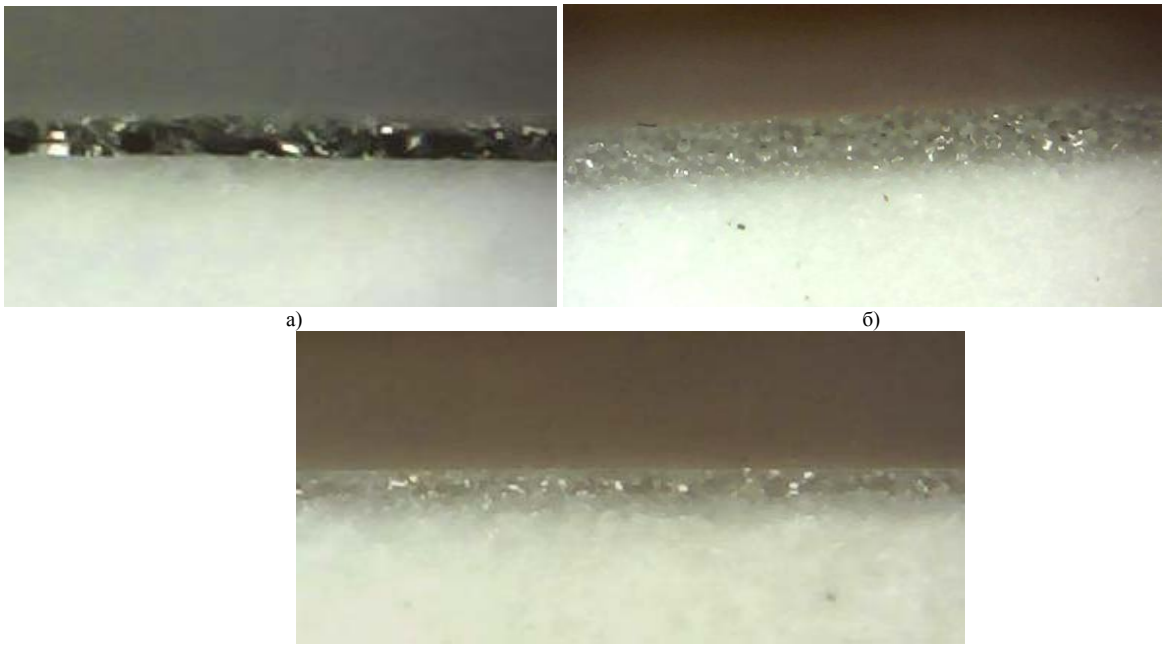
Температура нагрівання виробів, що викликає цек, °С	Строк служби виробів до появи цеку
120	декілька днів
150	3-4 міс.
160	15 міс.
170-180	2,5 роки
190	більше 2,5 років
200	глазур безумовно міцна

Отже, результати визначення термічної стійкості дають змогу встановити прогнозований строк експлуатації зразків тарілок фарфорових пиріжкових більше 2,5 років та стверджувати, що глазур міцна. Термічна стійкість виробів в значній мірі залежить від товщини глазурного шару. Вироби з товстим шаром глазурі менш термостійкі.

На наступному етапі зразки тарілок фарфорових пиріжкових піддавались лабораторному дослідженню методом світлової мікроскопії з визначенням мікроструктури черепка, яка є відмінною ознакою для різних видів кераміки.

Дослідження мікроструктури зламу черепка виробів проводили при денному освітленні із використанням мікроскопа USB Digital Microscope BW1008-500X зі збільшенням від 5 х до 500х. Перед початком дослідження кожен із виробів руйнувався механічним способом. Для дослідження зі зруйнованих виробів було відібрано 5 зразків довільної форми, звільнені по торцях від глазурі. Під час аналізу мікроструктури зламу черепка відібраних зразків проводилася фотографічна фіксація отриманих результатів (рис. 6).

Як бачимо, виявлена мікроструктура виробів однорідна, щільна, склоподібна. На зламах зразків, відібраних із виробів, чітко виражені шари безбарвної, прозорої глазурі та черепка білого кольору, черепок майже весь осклянілий, щільний, спечений. Мікроструктура зламу черепка зразків виробів 1–3 характерна для фарфору. Окрім того було виявлено, що мікроструктура зламу черепка зразка 2 відрізняється дрібнозернистістю. Це дало можливість зразку показати найкращі результати визначення термостійкості та витримати температуру 330°С.



а) б)

в)

Рис. 6. Фотографічне зображення мікроструктури зламів кераміки (збільшення у 500 разів): а) зразка 1; б) зразка 2; в) зразка 3

Після дослідження мікроструктури зламів кераміки перейшли до визначення водопоглинання зразків тарілок фарфорових пиріжкових за стандартною методикою насиченням черепка водою. Черепки виробів довільної форми, звільнені по торцях від глазурі, висушували в термостаті при температурі 100-120 °С до постійної маси. Потім зразки охолоджували в ексикаторі до температури (20±5) °С і зважували. Після цього зразки кип'ятили у воді протягом (4±0,5) год. і охолоджували до температури (20±0,5) °С. Потім зразки виймали з води, обтирали зволоженим віджатим рушником і відразу зважували. Результати визначення показників водопоглинання зразків тарілок фарфорових пиріжкових різних виробників наведений у таблиці 5. Таким чином, показник водопоглинання зразків тарілок фарфорових пиріжкових різних виробників лежить в межах від 0,1 до 0,2 та відповідає вимогам ГОСТ 28390-89 [8].

Одним із основних показників якості та естетичності зразків тарілок фарфорових пиріжкових є показник їх білості, який визначали за стандартною методикою на фотометрі ФО-1. Результати вимірювання білості зразків тарілок фарфорових пиріжкових різних виробників подані в таблиці 5. Таким чином, в результаті проведених досліджень встановлено, що всі зразки тарілок фарфорових пиріжкових різних виробників за показником білості відносять до 1 сорту. Результати визначення показників для порівняльного тестування наведені у таблиці 6.

Таблиця 6

Результати вимірювання геометричних показників зразків тарілок фарфорових пиріжкових

Назва показника	№ зразка		
	1	2	3
Діаметр, мм	151	175	175
Товщина, мм	3,7	3,3	4,1
Температура нагрівання виробів, що викликає утворення цеку глазурі	250	330	300
Водопоглинання, %	0,1	0,1	0,2
Білість, %	66,0	67,0	94,0

Показники, що були використані для порівняльного тестування, оцінювалися за такою шкалою:

- відмінно – від 4,6 до 5 зразок відповідає всім установленим вимогам НД і задовольняє споживчі очікування;
- добре – від 3,6 до 4,5 зразок має відхилення по деякими пунктами НД і недосить задовольняє споживчі очікування;
- задовільно – від 2,6 до 3,5 зразок має певні недоліки за визначеними показниками НД і не відповідає встановленим вимогам;
- погано – від 1,6 до 2,5 (з недоліками) зразок не задовольняє вимоги якості, що ускладнює його використання за призначенням;
- дуже погано – від 0 до 1,5 (не рекомендуємо) зразок неможливо використовувати за призначенням, він за всіма показниками не відповідає встановленим вимоги НД.

Рівень показників якості тарілок фарфорових пиріжкових були оцінені відповідно до ГОСТ 28390-

89 [8] за допомогою органолептичних і вимірювальних методів.

На основі отриманих даних порівняльного тестування була складена таблиця з результатами тестування зразків тарілок фарфорових пиріжкових (табл. 7).

Таблиця 7

Результати порівняльного тестування зразків тарілок фарфорових пиріжкових

№ з/п	Назва показника	Оцінювання зразків		
		1	2	3
1	Повнота і відповідність маркування НД	3	3	5
2	Наявність дефектів	5	5	1
3	Діаметр	5	5	5
4	Товщина, мм	5	5	5
5	Термічна стійкість, °С	5	5	5
6	Водопоглинання, %	5	5	5
7	Білість, %	5	5	5
	Загальна оцінка	4,7	4,7	4,4

У результаті проведеного порівняльного тестування зразків тарілок фарфорових пиріжкових були отримані такі результати:

- зразок 1 виробництва фірми «Wilmax» – 4,7 («відмінно»);
- зразок 2 виробництва Евершайн Файн Чайна Ко ЛТД Сяньтан, Дунюань, Хеюань, Гуандун, Китай ТМ «Conte», Білорусь – 4,7 («відмінно»);
- зразок 3 виробництва Дружківський фарфоровий завод – 4,4 («добре»).

Висновки. Аналіз узагальнених результатів порівняльного тестування тарілок фарфорових пиріжкових показав, що тільки вироби українського виробництва відповідають вимогам НД щодо маркування, але наявність на виробах дефектів суттєво знизило загальну оцінку.

Вироби англійського і китайського виробників, мають однакову високу оцінку. Вони відповідають вимогам до 1 сорту та не мають дефектів. Зниження оцінки пояснюється не повним обсягом реквізитів маркування, що нанесені на виробах. Це говорить про неможливість надання повної інформації про товар споживачеві.

Як показав аналіз результатів вибору показників якості тарілок фарфорових, до переліку обраних показників для проведення порівняльного тестування не увійшов такий важливий показник, як виділення шкідливих речовин. Визначення даного показника буде перспективним напрямом подальших досліджень.

Література

1. Кобрин В.М. Незалежне порівняльне тестування – орієнтир українського споживача на ринку товарів та послуг / В.М. Кобрин, В.С. Ольховська // Восточно-Европейский журнал передових технологий. – Харків, 2013. – Вип. 10 – С. 5–7.

2. Концепция развития в украине независимого сравнительного тестирования товаров и услуг для потребителей [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://www.consumerinfo.org.ua/testing/comparative-testing-concept.php. – Назва з екрану.

3. Концепция развития в Украине независимого сравнительного тестирования товаров и услуг для потребителей: Портал споживача [Електронний ресурс]. − Режим доступу : http://pidruchniki.com/10470406/pedagogika/innovatsiyni. – Назва з екрана.

4. Безрукий В. Сравнительное тестирование: Портал споживача [Електронний ресурс]. − Режим доступу : URL : http://www.consumerinfo.org.ua/must_know/quality/detail.php?ID=4289. – Назва з екрана.

5. Поліщук Л. В. Незалежне порівняльне тестування кухонного посуду з нержавіючої сталі / Л. В. Поліщук, О. В. Кириченко [Електронний ресурс]. – Режим доступу : www.nbuv.gov.ua/ujrn/soc_gum./Tti/2010_2/Polishuk.pdf. – Назва з екрану.

6. Мартосенко М. Г. Сравнительное тестирование колготок женских, что реализуются на украинском рынке [Електронний ресурс] / М. Г. Мартосенко, А. С. Браилко // ТАРП. – 2015. – № 3 (23). – Режим доступу : URL: http://cyberleninka.ru/article/n/sravnitelnoe-testirovanie-kolgotok-zhenskih-chto-realizuyutsya-na-ukrainskom-rynke . – Назва з екрану.

7. Система управления качеством продукции. Экспертные методы оценки качества промышленной

продукции. Организация и проведение экспертной оценки качества продукции : ГОСТ 23554.1-79 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://www.internet-law.ru/gosts/gost/59591/. – Назва з екрану. – (Довідковий).

8. Изделия фарфоровые. Технические условия : ГОСТ 28390-89 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://docs.cntd.ru/document/gost-28390-89. – Назва з екрану. – (Довідковий).

9. Посуд побутовий кухонний. Ч. 1 : ДСТУ EN 12983-1:2003; Загальні вимоги (EN 12983-1:2000, IDT). – Чинний від 01.07.2004. – К. : Держспоживстандарт України, 2004. – 20 с. – (Національний стандарт України).

10. Омельченко Н. В. Розробка алгоритму ідентифікації виду кераміки для митних цілей / Н. В. Омельченко, О. В. Калашник, Н. В. Лисенко // Науковий вісник Полтавського університету економіки і торгівлі. Серія : Технічні науки. – 2014. – № 1. – С. 102–111.

11. Система показателей качества продукции. Посуда фарфоровая и фаянсовая. Номенклатура показателей : ГОСТ 4.69-81 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://docs.cntd.ru/document/gost-4-69-81-spkp. – Назва з екрану. – (Довідковий).

12. Изделия фарфоровые и фаянсовые. Маркировка, упаковка, транспортирование и хранение : ГОСТ 28389-89 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://docs.cntd.ru/document/901712009. – Назва з екрану. – (Довідковий).

13. Посуд фарфоровий та фаянсовий. Метод визначання термостійкості : ДСТУ 8360:2015. – Чинний від 2017-07-01. – Київ : УкрНДНЦ, 2017. – III, 4 с. – (Національний стандарт України).

14. Технические требования к изделиям [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://www.stroitelstvo-new.ru/keramika/farfor-faience/glazing-6.shtml. – Назва з екрану.

References

1. Kobryn V.M. Nezalezhne porivnialne testuvannia – oriientyr ukrainskoho spozhyvacha na rynku tovariv ta posluh / V.M. Kobryn, V.S. Olkhovska // Vostochno-Evropeiskyi zhurnal peredovykh tekhnolohyi. – Kharkiv, 2013. – Vyp. 10 – S. 5–7.

2. Koncepcija razvitija v ukraine nezavisimogo sravnitel'nogo testirovanija tovarov i uslug dlja potrebitelej [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu : http://www.consumerinfo.org.ua/testing/comparative-testing-concept.php. – Nazva z ekranu.

3. Koncepcija razvitija v Ukraine nezavisimogo sravnitel'nogo testirovanija tovarov i uslug dlja potrebitelej: Portal spozhivacha [Elektronnij resurs]. − Rezhim dostupu : http://pidruchniki.com/10470406/pedagogika/innovatsiyni. – Nazva z ekrana.

4. Bezrukij V. Sravnitel'noe testirovanie: Portal spozhivacha [Elektronnij resurs]. − Rezhim dostupu : URL : http://www.consumerinfo.org.ua/must_know/quality/detail.php?ID=4289. – Nazva z ekrana.

5. Polishchuk L. V. Nezalezhne porivnialne testuvannia kukhonnoho posudu z nerzhaviiuchoi stali / L. V. Polishchuk, O. V. Kyrychenko [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : www.nbuv.gov.ua/ujrn/soc_gum./Tti/2010_2/Polishuk.pdf. – Nazva z ekranu.

6. Martosenko M. G. Sravnitel'noe testirovanie kolgotok zhenskih, chto realizujutsja na ukrainskom rynke [Elektronnij resurs] / M. G. Martosenko, A. S. Brailko // TARP. – 2015. – № 3 (23). – Rezhim dostupu : URL: http://cyberleninka.ru/article/n/sravnitelnoe-testirovanie-kolgotok-zhenskih-chto-realizuyutsya-na-ukrainskom-rynke . – Nazva z ekranu.

7. Sistema upravlenija kachestvom produkcii. Jekspertnye metody ocenki kachestva promyshlennoj produkcii. Organizacija i provedenie jekspertnoj ocenki kachestva produkcii : GOST 23554.1-79 [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu : http://www.internet-law.ru/gosts/gost/59591/. – Nazva z ekranu. – (Dovidkovij).

8. Izdelija farforovye. Tehnicheskie uslovija : GOST 28390-89 [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu : http://docs.cntd.ru/document/gost-28390-89. – Nazva z ekranu. – (Dovidkovij).

9. Posud pobutovyi kukhonnyi. Ch. 1 : DSTU EN 12983-1:2003; Zahalni vymohy (EN 12983-1:2000, IDT). – Chynnyi vid 01.07.2004. – K. : Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 2004. – 20 s. – (Natsionalnyi standart Ukrainy).

10. Omelchenko N. V. Rozrobka alhorytmu identyfikatsii vydu keramiky dlia mytnykh tsilei / N. V. Omelchenko, O. V. Kalashnyk, N. V. Lysenko // Naukovyi visnyk Poltavskoho universytetu ekonomiky i torhivli. Seriia : Tekhnichni nauky. – 2014. – № 1. – S. 102–111.

11. Sistema pokazatelej kachestva produkcii. Posuda farforovaja i fajansovaja. Nomenklatura pokazatelej : GOST 4.69-81 [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu : http://docs.cntd.ru/document/gost-4-69-81-spkp. – Nazva z ekranu. – (Dovidkovij).

12. Izdelija farforovye i fajansovye. Markirovka, upakovka, transportirovanie i hranenie : GOST 28389-89 [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu : http://docs.cntd.ru/document/901712009. – Nazva z ekranu. – (Dovidkovij).

13. Posud farforovyi ta faiansovyi. Metod vyznachannia termostiikosti : DSTU 8360:2015. – Chynnyi vid 2017-07-01. – Kyiv : UkrNDNTs, 2017. – III, 4 s. – (Natsionalnyi standart Ukrainy)

14. Tehnicheskie trebovanija k izdelijam [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu : http://www.stroitelstvo-new.ru/keramika/farfor-faience/glazing-6.shtml. – Nazva z ekranu.

Рецензія/Peer review : 17.01.2019 р. Надрукована/Printed :15.2.2019 р.
Рецензент: д.х.н., проф. Сахно Т.В.

DOI 10.31891/2307-5732-2019-269-1-114-117
УДК 544.77.051.62

В.Г. ЄФІМОВА, Т.М. ПИЛИПЕНКО, Л.А. ХРОКАЛО, О.В. ЛЯШУК, С.Ф. ФЕДОРЧУК
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ОТРИМАННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ ОСНОВИ ЕМУЛЬСІЙНИХ КОСМЕТИЧНИХ ПРОДУКТІВ З УРАХУВАННЯМ ПОВЕРХНЕВИХ ЯВИЩ У ДИСПЕРСНИХ СИСТЕМАХ

В статті проведено розробку основи емульсійного косметичного продукту. З використанням основних колоїдних закономірностей було визначено співвідношення поверхнево-активних речовин аніоногенної та неіоногенної природи, що стабілізували косметичну композицію, а також експериментальним шляхом визначено концентрацію фази масла. Проведені дослідження показали, що зразки основи косметичної емульсії стабільні з часом.

Ключові слова: аніоногенна поверхнево-активна речовини, неіоногенна поверхнево-активна речовина, емульсія, косметичний продукт.

V.G. YEFIMOVA, T.M. PILIPENKO, L.A. KHROKALO, O.V. LYSHUK, S.V. FEDORCHUK
National Technical University of Ukraine Igor Sikorsky Polytechnic Institute

RECEPTION OF OPTIMAL BASIS OF EMULSION COSMETIC PRODUCTS WITH SURFACE TYPES OF DISPERSION SYSTEMS

Synthesis of new emulsion cosmetic products with given consumer characteristics depends on colloidal and chemical properties of both source components and finished products. In this case, particular attention is paid to the problems of the stability of cosmetic emulsions and the selection of effective emulsifier. Therefore, the development of a scientifically grounded approach to the creation of new formulations requires knowledge of the colloidal and chemical properties of both the source components and the final cosmetic emulsions. Practice shows that as stabilizers of cosmetic emulsions, surface-active substances and their mixtures are most often used to obtain ready-made compositions with given properties. At the same time, the recipes of emulsion cosmetics are based on numerous experimental data, which greatly complicates and costs cosmetic production. Establishment of the basic colloid-chemical laws of the synthesis of cosmetic emulsions and the identification of the relationship between the colloid-chemical properties of the initial components and the characteristics of the final composition. Selection of a stabilizer, consisting of a mixture of surfactants; determination of the main colloid-chemical properties of surfactants and their mixtures, as well as the behavior of individual surfactants and their mixtures at the interface between the phases of the liquid-liquid. Using the surface tension data, an oil phase is selected at the interface between oil and water phases. According to the method of weight-volume of the drop, the data of the optimal ratio of emulsion stabilizers are determined. The obtained emulsions were investigated for colloidal stability. Exhausted method for obtaining a direct emulsion stabilized by a mixture of surface-active substances. An optimal concentration of a mixture of surface-active substances has been established, which allows achieving the maximum stabilizing effect. It is determined that in order to obtain emulsions, stable for several months, the introduction of additional structural formulation, which will be the subject of our further research, is required.

Keywords: *surface-active substance, adsorption equilibrium constant, emulsifier, cosmetic product, emulsion.*

Вступ

Емульсійні системи складають основу сучасних косметичних продуктів [1]. Важливим параметром, що дає можливість передбачити стабільність емульсійних систем є поверхневий натяг. На даний час відбувається постійна розробка нових емульсійних косметичних продуктів, де особлива увага приділяється їх стійкості. Відомо, що в якості стабілізаторів косметичних емульсій найчастіше використовуються поверхнево-активні речовини (ПАР) та їх суміші. При цьому аналіз літературних даних свідчить, що рецептури емульсійних косметичних засобів базуються на численних експериментальних даних, що значно ускладнює і здорожує випуск косметичної продукції [1–3]. Тому розробка науково-обґрунтованого підходу до створення нових рецептур косметичних засобів є актуальною задачею.

Постановка завдання

Встановлення основних колоїдних закономірностей отримання косметичних емульсій є актуальним напрямком дослідження в області створення нових косметичних препаратів. Тому метою наукової роботи було:

1) визначення основних колоїдно-хімічних властивостей суміші ПАР;
2) вивчення поведінки суміші ПАР на межі поділу фаз розчин ПАР – масло.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Літературні дані свідчать, що в якості стабілізаторів косметичних емульсій все частіше застосовують бінарні суміші (ПАР) [4], оскільки вони призводять до ефективного зниження поверхневого натягу. При цьому дослідження сумішей ПАР нечисленні, і в основному присвячені вивченню міцелоутворенню і адсорбції на межі поділу фаз водний розчин (ПАР) – повітря [5, 6]. На даний час для вибору ПАР користуються системою ГЛБ (гідрофільно-ліпофільний баланс), яка дозволяє передбачити лише тип емульсії, що одержується з енергетичних позицій і не враховує особливості будови ПАР [7]. Отже, дослідження поведінки бінарних систем на межі поділу фаз водний розчин ПАР–масло недостатньо вивчена та не описана в літературі.

Мета і завдання дослідження

Розробка складу основи емульсійного косметичного засобу, що стабілізована сумішшю поверхнево активних речовин різної природи, а також дослідження емульсійних та органолептичних властивостей емульсії, що була отримана.

Виклад основного матеріалу

Стабільність косметичних емульсій залежить від сукупності багатьох параметрів, таких як природа

дисперсійного середовища і дисперсної фази, величини поверхневого натягу, в'язкості системи і деяких інших. Перераховані фактори, в свою чергу, істотно впливають на споживчі характеристики косметичної продукції. При цьому при підборі компонентів косметичного продукту необхідно дотримання балансу між ціною і якістю.

Основними компонентами косметичних емульсій є олії і стабілізатори, роль останніх грають суміші поверхнево-активних речовин.

В наших дослідженнях у якості масляної фази ми обрали олію жожоба, з низьким поверхневим натягом на межі поділу фаз вода-масло, відносно дешеве, доступне та є компонентом, що широко застосовується у виробництві косметичних продуктів.

При виборі ПАР речовин ми керувалися принципами, що вони використовуються у хімічній технології косметичних засобів, є індивідуальними речовинами та розчинні у воді. Тому в якості об'єктів дослідження були обрані дві водорозчинні ПАР – аніоногенна і неіоногенна.

В якості неіоногенної поверхнево-активної речовини (НПАР) використовувався емульгатор Твин – 80 ($C_{64}H_{124}O_{26}$), з молекулярною масою 1308 г/моль. Це рідина світло-жовтого кольору.

Як іоногенна поверхнево-активна речовина (АПАР) застосовувався аніонний емульгатор триетаноламін лаурилсульфат ($C_{18}H_{41}NO_7S$), з молекулярною масою 415 г/моль, являє собою білий порошок.

Обрані сполуки ПАР випускаються у промислових масштабах, при цьому їх колоїдно-хімічні характеристики у відкритих джерелах відсутні. Знання цих характеристик необхідно для обґрунтованого підходу при розробці рецептур косметичних продуктів на їх основі, тому далі ми представляємо експериментальні результати з їх визначення.

В якості колоїдно-хімічних характеристик суміші ПАР ми розглядали такі параметри як товщина адсорбційного шару, площу, що займає одна молекула ПАР в адсорбційному шарі на межі поділу фаз водний розчин ПАР – масло.

Поверхневий натяг на межі водний розчин ПАР-масло визначався методом ваги-об'єму краплі за відомою методикою [8].

При розробці рецептур емульсійних продуктів великого значення набуває поверхневий натяг окремих ПАР на межі поділу водний розчин ПАР – масло. Для цього нами були приготовлені розчини АПАР та НПАР з різними концентраціями.

Значення величини максимальної адсорбції визначалося з використанням класичного рівняння Гіббса [9]:

$$\Gamma = -\frac{c}{RT} \cdot \frac{d\sigma}{dc}, \quad (1)$$

де Γ – питома адсорбція речовини, моль/м^2, тобто надмірна концентрація розчиненої речовини в поверхневому шарі розчину порівняно з його об'ємною концентрацією c; σ – поверхневий натяг розчину, мН/м; R – універсальна газова стала; T – абсолютна температура, К.

Площа, яку займає одна молекула в адсорбційному шарі, буде складати:

$$S_0 = \frac{1}{\Gamma_\infty \cdot N}, \quad (2)$$

Таблиця 1

Зміна поверхневого натягу розчину поверхнево-активних речовин різної природи

Концентрація неіоногенної поверхнево-активної речовини, с, моль·м$^{-3}$	Поверхневий натяг, σ, мН·м$^{-1}$	Концентрація аніоногенної поверхнево-активної речовини, с, моль·м$^{-3}$	Поверхневий натяг, σ, мН·м$^{-1}$
1,0	26,0	1,0	22,8
1,5	25,8	1,5	20,3
2,0	24,5	2,0	19,8
2,5	23,2	2,5	17,3
3,0	20,1	3,0	14,1
4,0	15,6	4,0	13,2
5,0	14,8	5,0	11,8
6,0	15,0	6,0	9,6
7,0	15,2	7,0	9,5
8,0	15,1	8,0	9,4
9,0	15,2	9,0	9,5
10,0	15,2	10,0	9,5

де N – число Авогадро ($6{,}023 \cdot 10^{23}$ моль$^{-1}$); Γ_∞ – величина граничної адсорбції, моль/м^2. Товщина адсорбційного моношару відповідно визначалась як:

$$l = \frac{M \cdot \Gamma_\infty}{\rho}, \quad (3)$$

де M – молярна маса адсорбованої речовини, г/моль; ρ – густина адсорбованої речовини, кг/м^3.

Вихідні експериментальні ізотерми поверхневого натягу наведені у таблиці 1.

Розрахунок параметрів адсорбційних шарів проводився з використанням рівнянь (1), (2) і (3). Параметри адсорбційних шарів наведено у таблиці 2.

Аналіз даних, представлених в таблиці 2, свідчить про те, що на міжфазній поверхні розчин АПАВ адсорбується краще з утворенням більш щільного моношару.

Таблиця 2

Значення параметрів адсорбційних шарів водорозчинних ПАР на межі поділу фаз розчин-масло

ПАР	$\Gamma_\infty \cdot 10^6$, моль·м$^{-2}$	S_0, нм^2	l, нм
АПАР	1,85	1,25	1,25
НПАР	3,57	8,31	3,54

Для визначення найкращого співвідношення АПАР і НПАР були отримані ізотерми поверхневого натягу з різним співвідношенням АПАР і НПАР. Поверхневий натяг визначалося на межі поділу фаз розчин – масло. Результати досліджень наведені на рис. 1.

Дані рис. 1 свідчать, що найкращі результати спостерігаються при співвідношенні АПАР:НПАР як 4:1, оскільки ізотерма при цьому співвідношенні розташовується нижче всіх.

Додаткову інформацію о колоїдно-хімічних властивостях ПАР на границі поділу фаз розчин – олія можуть дати константи рівняння Шишковського. Згідно цього рівняння зниження поверхневого натягу зі зростанням концентрації ПАР має вигляд [9]:

$$\Delta\sigma = \sigma_0 - \sigma = B\ln(1 + Ac), \qquad (4)$$

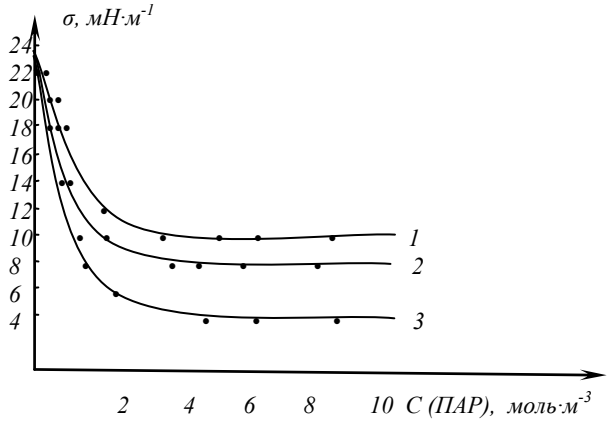


Рис. 1. Ізотерми поверхневого натягу суміші АПАР та НПАР: 1 – АПАР:НПАР = 1:4; 2 - АПАР:НПАР = 1:1; 3 - АПАР:НПАР = 4:1

де σ_0 – поверхневий натяг чистого розчинника, мН·м$^{-1}$; σ – поверхневий натяг розчину ПАР, мН·м$^{-1}$; B – константа для всього гомологічного ряду ПАР; A – константа для відповідного ПАР; c – концентрація розчину ПАР, моль·м$^{-3}$.

В диференційній формі це рівняння набуває вигляду:

$$\frac{d\sigma}{dc} = \frac{BA}{1 + Ac}. \qquad (5)$$

Величина гіббсовської адсорбції пов'язана з константами рівняння Шишковського наступним чином [9]:

$$\Gamma = \Gamma_\infty \cdot \frac{Kc}{1 + Kc}, \qquad (6)$$

де K – константа адсорбційної рівноваги, що характеризує міжмолекулярну взаємодію в адсорбційних шарах, які складаються з суміші ПАР, м^3·моль$^{-1}$.

В таблиці 3 наведені константи рівняння Шишковського, що розраховані для кожного співвідношення суміші ПАР.

Таблиця 3

Константи рівняння Шишковського для суміші ПАР в різних співвідношеннях

Співвідношення АПАР:НПАР	Константа К, м^3·моль$^{-1}$
4:1	298
1:1	102
1:4	18

Результати табл. 3 підтверджують, що збільшення вмісту в суміші НПАР призводить до послаблення взаємодії у міжфазному шарі, а зростання вмісту АПАР призводить до різкого зросту величини К та посиленню взаємодії. Максимальна величина константи відповідає співвідношенню АПАР:НПАР = 4:1.

Подальше збільшення вмісту АПАР в суміші не призводить до суттєвого зменшення поверхневого натягу, тому співвідношення АПАР:НПАР = 4:1 було обрано оптимальним с точки зору даної суміші.

Наступним етапом досліджень було визначення концентрації масляної фази, за якої утворюється стабільна емульсія.

В косметичних емульсійних продуктах вміст фази масла знаходиться в межах від 1–20 об%, в залежності від виду продукції. В наших дослідженнях кількість фази масла, яка дозволяє отримувати стабільні емульсії, що стабілізовані сумішшю ПАР, визначалася експериментально, оскільки суміш ПАР раніше на використовувалася, отже будь-які літературні дані відсутні.

Модельні косметичні емульсії в широкому інтервалі концентрацій фази масла були отримані в

присутності сумішей ПАР в різних співвідношеннях. В якості критерія стійкості емульсії був час розшарування композиції, який визначався візуально.

Для отримання емульсійної бази косметичної композиції необхідну кількість компонентів водневої фази (Твин – 80 та триетаноламін лаурилсульфат) розчиняли у воді та нагрівали до температури 75 °С. Фаза олії, нагрівалася до температури 75 °С. Далі водневу фазу і фазу олії змішували та перемішували до температури 50 °С, а потім диспергували протягом 2 хвилин на гомогенізаторі зі швидкістю обертання 4000 об/хв. Отриману емульсію охолоджували до кімнатної температури. Після цього проводили візуальне спостереження за розшаруванням емульсій, що були отримані.

Результати досліджень показали, що оптимальна концентрація суміші НПАР та АПАР складає 4 моль/м^3. Ця концентрація була обрана в результаті проведених раніше досліджень адсорбції суміші ПАР на межі поділу фаз розчин – масло. Концентрація фази олії була в інтервалі від 0,1 до 10 об%. В якості стабілізатора першого досліду було використано АПАР, а другого – НПАР. При стабілізації емульсії АПАР час існування емульсії становить 12 годин, а при стабілізації НПАР – 6 год.

Подальші експерименти показали, що максимальний час існування емульсії спостерігається при концентрації фази масла 5 об% та стабілізації сумішшю АПАР:НПАР = 4:1. Даний стабілізатор дозволяє отримувати емульсії, стабільні протягом кількох діб. Для отримання емульсій, стійких протягом декількох місяців, потрібне введення додаткового структуроутворювача, що буде подальшою темою наших досліджень.

Висновки

Отримані дані колоїдно-хімічних властивостей суміші ПАР на границі поділу фаз розчин – масло, а саме константи рівняння Шишковського, дозволили визначити оптимальне співвідношення ПАР. Встановлено оптимальну концентрацію суміші ПАР для отримання максимального стабілізуючого ефекту. Визначено максимальний час існування косметичної емульсії.

Література

1. Chudinova N.B. Control of some colloid-chemical behaviors when developing cosmetic creams / N.B. Chudinova, K.I. Kienskaya, G.V. Avramenko // Proceedings of the XXV-th International Symposium Physicochemical Methods of Separation «Ars Separatoria» (19–23 april 2010 e., Torun). – Torun, 2010.– P. 254–256.

2. Самуйлова Л.Н. Косметическая химия : в 2 ч. Часть 1. Ингредиенты / Л.Н. Самуйлова, Т.М. Пучкова. – М. : Школа косметических химиков, 2005. – 336 с.

3. Кутц Г. Косметические кремы и эмульсии: состав, получение, методы испытаний / Г. Кутц. – М. : Косметика и медицина, 2004. – 267 с.

4. Cattley K. Pre-clinical formulation screening, development and stability of acetyl aspartic acid for cosmetic application / K. Cattley, L. Duracher, P. Camattari, A. Mavon, S. Grooby // International Journal of Cosmetic Science. – 2015. – Vol. 37. – P. 28–33.

5. Smaoui S. Cosmetic emulsion from virgin olive oil: Formulation and bio-physical evaluation / S. Smaoui, H. Ben Hlima, R. Jarraya, N. Grati Kamoun , R. Ellouze, M. Damak // African Journal of Biotechnology. – 2012. – Vol. 11(40). – P. 9664–9671.

6. Hibbott H. W. Handbook of cosmetic science: an introduction to principles and applications / H.W. Hibbott. – New York, USA : Oxford, 2016. – 566 p.

7. Barel André O. Handbook of Cosmetic Science and Technology, Fourth Edition / A. O. Barel, M. K. Paye, H. I. Maibach. – France : Taylor & Francis, 2009. – 600 p.

8. Yildirim O. E. Analysis of the drop weight method / O. E. Yildirim, O. A. Basaran // Physics of Fluids.– 2005. – Vol. 15. – P. 23–35.

9. Гомонай В.І. Фізична та колоїдна хімія / Гомонай В.І. – Вінниця : Нова Книга, 2012. – 496 с.

References

1. Chudinova N.B. Control of some colloid-chemical behaviors when developing cosmetic creams / N.B. Chudinova, K.I. Kienskaya, G.V. Avramenko // Proceedings of the XXV-th International Symposium Physicochemical Methods of Separation «Ars Separatoria» (19–23 april 2010 e., Torun). – Torun, 2010.– R. 254–256.

2. Samujlova L.N. Kosmeticheskaja himija : v 2 ch. Chast' 1. Ingredienty / L.N. Samujlova, T.M. Puchkova. – M. : Shkola kosmeticheskih himikov, 2005. – 336 s.

3. Kutc G. Kosmeticheskie kremy i jemul'sii: sostav, poluchenie, metody ispytanij / G. Kutc. – M. : Kosmetika i medicina, 2004. – 267 s.

4. Cattley K. Pre-clinical formulation screening, development and stability of acetyl aspartic acid for cosmetic application / K. Cattley, L. Duracher, P. Camattari, A. Mavon, S. Grooby // International Journal of Cosmetic Science. – 2015. – Vol. 37. – R. 28–33.

5. Smaoui S. Cosmetic emulsion from virgin olive oil: Formulation and bio-physical evaluation / S. Smaoui, H. Ben Hlima, R. Jarraya, N. Grati Kamoun , R. Ellouze, M. Damak // African Journal of Biotechnology.¬ –2012. – Vol. 11(40). – R. 9664–9671.

6. Hibbott H. W. Handbook of cosmetic science: an introduction to principles and applications / H.W. Hibbott. – New York, USA : Oxford, 2016. – 566 r.

7. Barel André O. Handbook of Cosmetic Science and Technology, Fourth Edition / A. O. Barel, M. K. Paye, H. I. Maibach. – France : Taylor & Francis, 2009. – 600 r.

8. Yildirim O. E. Analysis of the drop weight method / O. E. Yildirim, O. A. Basaran // Physics of Fluids.–2005. – Vol. 15. – R. 23–35.

9. Homonai V.I. Fizychna ta koloidna khimiia / Homonai V.I. – Vinnytsia : Nova Knyha, 2012. – 496 s.

Рецензія/Peer review : 16.11.2018 р. Надрукована/Printed :15.2.2019 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Чигиринець О.Е.

DOI 10.31891/2307-5732-2019-269-1-118-121
УДК 677.027.4

О.Я. СЕМЕШКО, Н.С. СКАЛОЗУБОВА
Херсонський національний технічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПІДГОТОВКИ НА КІНЕТИКУ СОРБЦІЇ ТА СТУПІНЬ ФІКСАЦІЇ АКТИВНИХ БАРВНИКІВ НА БАВОВНЯНОМУ ТРИКОТАЖІ

У статті наведені результати дослідження впливу способу підготовки бавовняного трикотажу на кінетику сорбції та показник ступеня фіксації активних барвників при подальшому фарбуванні. Встановлено, що відварка або біління бавовняного трикотажу індивідуально забезпечує низьку сорбцію активних барвників і, як наслідок, знижені показники їх ступеня фіксації. Базовий та розроблений режими підготовки сприяють отриманню високих показників сорбції та ступеня фіксації активних барвників. Розроблений спосіб підготовки здійснюється при суміщенні відварки та біління і зниженій температурі обробки, що забезпечує економічність розробленої технології.

Ключові слова: бавовняний трикотаж, активні барвники, підготовка, фарбування, сорбція, ступінь фіксації барвника.

O.YA. SEMESHKO, N.S. SKALOZUBOVA
Kherson National Technical University

STUDY OF THE EFFECT OF PREPARATION ON THE SORPTION AND THE DECISION OF THE REACTIVE DYES ON THE COTTON KNITTED FABRIC

The article presents the results of a study of the influence of the method of preparation a cotton knitted fabric on the sorption kinetics and the index of the degree of fixation of reactive dyes upon further dyeing. Cotton knitted fabric was prepared by the method of boiling, bleaching, by sequential boiling and bleaching and according to the combined developed technology of preparation. Dyeing was carried out with reactive bifunctional dyes. The kinetics of sorption and the degree of fixation of the reactive dyes were studied spectrophotometrically by determining the amount of dye in the residual and wash baths. It has been established that boiling or bleaching of cotton knitted fabric individually provides low sorption of reactive dyes and, as a result, reduced indexes of the degree of their fixation. The basic and developed modes of preparation contribute to obtaining high rates of sorption and the degree of fixation of reactive dyes. The developed method of preparation is carried out with the combination of boiling and bleaching and low processing temperature, which ensures the efficiency of the developed technology.

Keywords: cotton knitted fabric, reactive dyes, preparation, dyeing, sorption, degree of dye fixation.

Вступ

На сьогоднішній день в Україні виробництво трикотажних полотен перевищує випуск тканин у 1,3 рази, що викликане підвищеним попитом споживачів на трикотажний одяг для будь-якого сезону [1]. Для пошиття літнього одягу переважно використовують бавовняний трикотаж завдяки його високим гігієнічним властивостям. До якості його опорядження висуваються підвищені вимоги, адже одяг літнього асортименту зазнає впливу світлопогоди, поту, а також частого прання. Тому бавовняні трикотажні полотна для виробів вказаного асортименту підлягають ретельній підготовці для забезпечення високих показників капілярності, фарбуванню активними барвниками, що забезпечують отримання забарвлень з високими показниками стійкості до фізико-хімічних дій, та заключному оздобленню, частіше всього обробці пом'якшувачами [2].

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Процес підготовки бавовняного трикотажу є найбільш технологічно складним, енерговитратним і трудомістким етапом опоряджувального виробництва і складається з операцій відварювання та біління. Відомо [3, 4], що підготовка включає сукупність процесів, що забезпечують видалення з суворого трикотажу природних домішок (головним чином, соскоподібних та барвних речовин) і речовин, нанесених на тканину при їх виготовленні (замаслювачів), з метою надання їм високої капілярності і білизни. У процесі підготовки на текстильні матеріали впливають лужний розчин для відварювання і пероксидні сполуки при білінні за високої температури, що є причиною зниження ступеня полімеризації целюлози і втрати міцності текстильного матеріалу.

Чим в більш м'яких умовах буде здійснюватися підготовка текстильних матеріалів, тим більше збережуться міцність і природні властивості целюлози і тим вищу якість матиме готовий одяг [5–7]. Науково-обґрунтоване суміщення операцій промивання і біління є особливо актуальним при виробництві бавовняних трикотажних полотен високої якості з низькою собівартістю, оскільки процеси відбуваються послідовно на одному і тому ж обладнанні.

У результаті суміщенні процесів промивання і біління не повинно позначитись на якості як відбіленого, так і пофарбованого трикотажу.

Можна стверджувати, що, загалом, якість забарвлення залежить від швидкості дифузії і сорбції барвника, які визначаються фізико-хімічними властивостями волокна [8]. Відомо, [6, 7] що на тканини, яка була максимально очищена від природних і технологічних забруднень, можна отримати чисті і яскраві забарвлення, стійкі до прання, сухого і мокрого тертя.

Формулювання мети дослідження

Відповідно до цього в роботі ставилося завдання вивчити вплив способу підготовки бавовняного

трикотажного полотна на його сорбційну здатність по відношенню до активних барвників і їх ступінь фіксації.

Матеріали і методи дослідження

Дослідження здійснювалось з використанням бавовняного трикотажного полотна ластичного переплетення 1×1 з поверхневою щільністю 150 г/см^2.

Відварка трикотажного полотна здійснювалось у розчині, що містить TF-129B (миючий агент) – 2 г/л; Albafluid CD (протизаломлювач) – 0,8 г/л; сода кальцинована – 1,5 г/л при 80°С протягом 20 хв. Після обробки зразки промивали в гарячій і холодній воді та висушували.

Біління проводили у розчині, що містить Ultravalon TC (змочувальний агент) – 1,1 г/л; Albafluid CD (протизаломлювач) – 0,8 г/л; Albaflow FFC-01 (піногасник) – 0,5 г/л; Clarite (стабілізатор пероксиду водню) – 0,4 г/л; пероксид водню 60%-ий – 1,5 г/л; гідроксид натрію – 1,5 г/л. Обробку виконували при 98°С протягом 20 хв. Потім текстильний матеріал промивали в гарячій воді, проводили нейтралізацію пероксиду водню, знову промивали та висушували.

Реалізація суміщеної технології підготовки бавовняного трикотажного полотна здійснювали у розчині, що містить композицію поверхнево-активних речовин (ПАР) – 1,5 г/л; пероксид водню 60-відсотковий – 1,5 г/л; гідроксид натрію – 1,5 г/л. Обробку здійснювали при 80°С протягом 20 хв. Потім текстильний матеріал промивали в гарячій воді, проводили нейтралізацію пероксиду водню, знову промивали та висушували.

Суміщений режим підготовки трикотажного полотна і склад композиції ПАР були розроблені в попередніх роботах [9–11]. Композиція ПАР містить в певному співвідношенні Ultravon TC в якості змочувача, Albafluid CD – протизаломлювача, Albaflow FFC-01 – піногасника і Оксіпав А1214С.50 в якості миючої речовини.

У роботі були використані текстильно-допоміжні речовини Ultravalon TC, Albafluid CD, Albaflow FFC-01, Clarite виробництва «Huntsman NMG», а Оксіпав А1214С.50 – ТОВ НВО «НИИ ПАВ».

Фарбування бавовняного трикотажного полотна здійснювалося активними біфункціональними барвниками Bezaktiv Cosmos S-C: Rot і Blue («Bezema») способом вибирання при модулі ванни М=50. Фарбувальний розчин містив 1% барвника, 30 г/л NaCl та 15 г/л Na_2CO_3.

Фарбування проводили протягом 100 хв. при температурі 60°С. Кінетику сорбції активних барвників визначали шляхом колориметрування залишкових ванн через певні проміжки часу на фотоколориметрі ФЕК-2.

Після фарбування протягом 100 хв. зразки промивали в холодні та гарячій воді, киплячому мильному розчині, гарячій та холодній воді і висушувались.

Визначення ступеня фіксації барвника здійснювали на підставі спектрофотометричного аналізу вихідного фарбувального та залишкового після фарбування розчинів і промивних ванн. Ступінь фіксації вираховували за формулою:

$$СФ = 100 - \frac{D_{зал} + \sum D_{пр}}{D_{вих}} \cdot 100, \quad (1)$$

де $D_{зал}$ – оптична щільність залишкового розчину після фарбування;

$D_{пр}$ – оптична щільність промивного розчину;

$D_{вих}$ – оптична щільність вихідного фарбувального розчину [12].

Результати дослідження та їх обговорення

Зразки бавовняного трикотажного полотна були підготовані за наступними технологіями: 1) відварка; 2) біління; 3) послідовна відварка та біління – базова технологія підготовки; 4) суміщений режим відварки та біління – розроблена технологія.

На рис. 1 наведені результати визначення кінетики сорбції досліджуваних активних барвників отриманими зразками трикотажного полотна.

Кінетичні криві сорбції біфункціональних активних барвників Bezaktiv Cosmos Rot S-C та Bezaktiv Cosmos Blue S-C показують, що спосіб підготовки впливає на кількість сорбованого трикотажним полотном барвника. Найменші показники сорбції досліджуваних барвників спостерігаються для зразків трикотажу, що був підготований способом відварки та біління і максимально складає для Bezaktiv Cosmos Rot S-C 6,8-7,4 г/кг, для Bezaktiv Cosmos Blue S-C – 5,6-5,7 г/кг.

Зразки, що були підготовані за двостадійною базовою технологією та за суміщеним розробленим режимом демонструють високі показники сорбції активних барвників. Для зразків, підготовлених за базовою технологією, сорбція складає 9,55-9,66 г/кг, а за суміщеним розробленим режимом досягаються дещо вищі показники: 9,69-9,68 г/кг.

Зважаючи на те, що активні барвники хімічно зв'язуються з целюлозою бавовняного трикотажу, в багатьох випадках сорбція барвника ще не означає його хімічну реакцію з волокном. Ступінь фіксації активних барвників на текстильних матеріалах залежить від умов проведення процесу фарбування, властивостей барвника, вмісту в технічному барвнику гідролізованої форми, що не здатна вступати у хімічну взаємодію з целюлозою, та від властивостей текстильного матеріалу [12].

Далі у роботі було визначено показники ступеня фіксації активних барвників для трикотажу, підготовленого за різними технологіями (рис. 2).

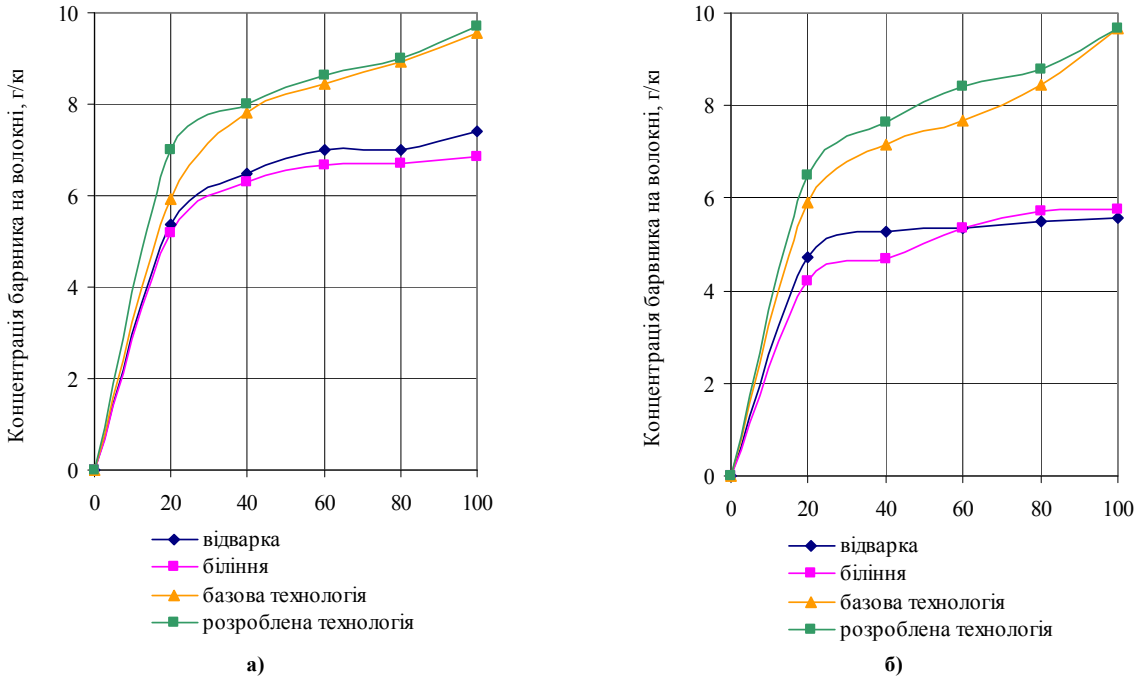


Рис. 1. Залежність кінетики сорбції активних барвників від способу підготовки бавовняного трикотажу: а) Bezaktiv Cosmos Rot S-C; б) Bezaktiv Cosmos Blue S-C.

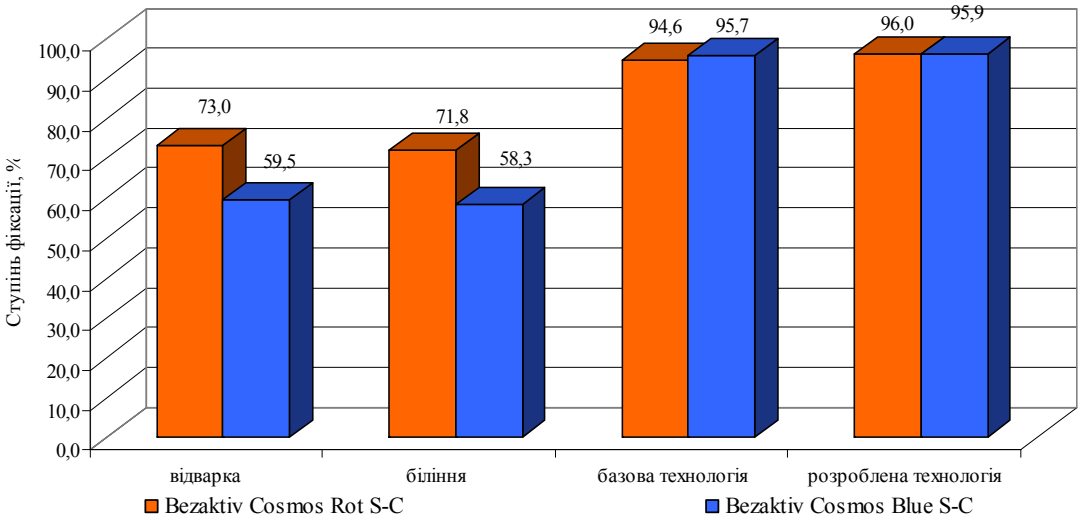


Рис. 2. Залежність ступеня фіксації активних барвників від способу підготовки бавовняного трикотажу

Результати, представлені на діаграмі рис. 2, показують, що спосіб підготовки впливає на ступінь фіксації досліджуваних активних барвників. Найнижчий ступінь фіксації досягається при фарбуванні зразків трикотажу після відварки та біління і складає 58,3–73,0%. Після підготовки за базовою та розробленої технологіями спостерігається високий показник ступеня фіксації активних барвників бавовняним трикотажем – 94,6–96,0%. Це можна пояснити тим, що після підготовки текстильного матеріалу за вказаними технологіями найбільш повно видаляються природні супутні речовини бавовни та технологічні забруднення, що призводить до високої сорбційної здатності бавовняного трикотажу (рис. 1) та, як наслідок, до підвищення ступеня фіксації активних барвників.

Слід зазначити, що сорбція активних барвників та показники ступеня фіксації для зразків бавовняного трикотажу, що були підготовані за базовим та розробленим режимами знаходять приблизно на одному рівні. Однак вказані показники для трикотажу, обробленому за розробленою технологією підготовки, досягаються при суміщенні відварки і біління та зниженні температури зі 100 до 80°С, що позитивно позначиться на собівартості продукції. Ефективність розробленої технології підготовки бавовняного трикотажу пояснюються застосуванням високоефективної композиції ПАР.

Висновки

У результаті проведених досліджень встановлено, що технологія підготовки впливає на кінетику сорбції та ступінь фіксації активних барвників бавовняним трикотажним полотном. Визначено, що відварка або біління бавовняного трикотажу індивідуально забезпечує низьку сорбцію активних барвників і, як наслідок, знижені показники їх ступеня фіксації 58,3–73,0%. Високі показники сорбції та фіксації досліджуваних активних барвників спостерігаються для бавовняного трикотажного полотна, обробленого за

базовим та розробленим режимами. Розроблений спосіб підготовки має переваги в порівнянні з базовим, що полягають у суміщенні відварки та біління і зниженні температури обробки зі 100 до 80°С, що забезпечує економічність розробленої технології.

Література

1. Українська асоціація підприємств легкої промисловості [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://ukrlegprom.org.ua/news/informatsiya-pro-vseukrainskiy-z_izd-legkoi-promislovosti-/.
2. Чешкова А.В. Химические технологии и оборудование трикотажного отделочного производства / А.В. Чешкова. – Иваново : Иван. гос. хим.-технол., 2008. – 113 с.
3. Shao J. Cold pad-batch bleaching of cotton fabrics with a TAED/H2O2 activating system / J. Shao, Y. Huang, Z. Wang, J. Liu // Coloration Technology. – 2010. – Vol. 126(2). – P. 103–108. – doi: 10.1111/j.1478-4408.2010.00234-x.
4. Tzanov T. Bio-preparation of cotton fabrics / T. Tzanov, M. Calafell, G.M. Guebitz, A. Cavaco-Paulo // Enzyme and Microbial Technology. – 2001. – Vol. 29(6-7). – P. 357–362. – doi: 10.1016/s0141-0229(01)00388-x.
5. Hartzell M.M. Enzymatic Scouring to Improve Cotton Fabric Wettability / M.M. Hartzell, Y.-L. Hsieh // Textile Research Journal. – 1998. – Vol. 68(4). – P. 233–241. – doi: 10.1177/004051759806800401.
6. Prabaharan M. Study on ozone bleaching of cotton fabric – process optimisation, dyeing and finishing properties / M. Prabaharan, J.V. Rao // Coloration Technology. – 2001. – Vol. 117(2). – P. 98–103. – doi: 10.1111/j.1478-4408.2001.tb00342.x.
7. Hashem M. Pre-cationization of cotton fabrics: An effective alternative tool for activation of hydrogen peroxide bleaching process / M. Hashem, M. El-Bisi, S. Sharaf, R. Refaie // Carbohydrate Polymers. – 2010. – Vol. 79(3). – P. 533–540. – doi: 10.1016/j.carbpol.2009.08.038.
8. Ali S. Integrated desizingebleachingereactive dyeing process for cotton towel using glucose oxidase enzyme / S. Ali, Z. Khatri, A. Khatri, A. Tanwari // Journal of Cleaner Production. – 2014. – Vol. 66. – P. 562–567. – doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.11.035.
9. Skalozubova N. Designing a composition formulation of surface active substances for the pretreatment of knitted fabric / N. Skalozubova, A. Kunik, O. Semeshko, Yu. Saribyekova, S. Myasnykov // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Technology organic and inorganic substances. – 2016. – Vol. 4/6(82). – P. 29–36. – doi: 10.15587/1729-4061.2016.75027.
10. Патент №115669 UA. МПК D06M 9/04 (2006/01). Композиція поверхнево-активних речовин для підготовки бавовняного трикотажного полотна / Н.С. Скалозубова, О.Я. Семешко, Ю.Г. Сарібєкова (Україна). – № u 2016 10932. – Заявл. 31.10.2016 ; опубл. 25.04.2017, Бюл. № 8. – 4 с.
11. Semeshko O. Optimization of preparation technology of a cotton knitted fabric by the method of mathematical planning / O. Semeshko, T. Asaulyuk, Yu. Saribyekova // Proceedigns of 2th International Conference [«EastWest Chemistry Conference»], (Lviv, October 10–12, 2018). – Lviv Polytechnic Natonal University, 2018. – P. 186.
12. Отделка хлопчатобумажных тканей : в 2 ч. Ч. 1. Технология и ассортимент хлопчатобумажных тканей / [под ред. Б.Н. Мельникова]. – М. : Легкомбытиздат, 1991. – 432 с.

References

1. Ukrainska asotsiatsiia pidpryiemstv lehkoi promyslovosti [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : http://ukrlegprom.org.ua/news/informatsiya-pro-vseukrainskiy-z_izd-legkoi-promislovosti-/.
2. Cheshkova A.V. Himicheskie tehnologii i oborudovanie trikotazhnogo otdelochnogo proizvodstva / A.V. Cheshkova. – Ivanovo : Ivan. gos. him.-tehnol., 2008. – 113 s.
3. Shao J. Cold pad-batch bleaching of cotton fabrics with a TAED/H2O2 activating system / J. Shao, Y. Huang, Z. Wang, J. Liu // Coloration Technology. – 2010. – Vol. 126(2). – P. 103–108. – doi: 10.1111/j.1478-4408.2010.00234-x.
4. Tzanov T. Bio-preparation of cotton fabrics / T. Tzanov, M. Calafell, G.M. Guebitz, A. Cavaco-Paulo // Enzyme and Microbial Technology. – 2001. – Vol. 29(6-7). – P. 357–362. – doi: 10.1016/s0141-0229(01)00388-x.
5. Hartzell M.M. Enzymatic Scouring to Improve Cotton Fabric Wettability / M.M. Hartzell, Y.-L. Hsieh // Textile Research Journal. – 1998. – Vol. 68(4). – P. 233–241. – doi: 10.1177/004051759806800401.
6. Prabaharan M. Study on ozone bleaching of cotton fabric – process optimisation, dyeing and finishing properties / M. Prabaharan, J.V. Rao // Coloration Technology. – 2001. – Vol. 117(2). – P. 98–103. – doi: 10.1111/j.1478-4408.2001.tb00342.x.
7. Hashem M. Pre-cationization of cotton fabrics: An effective alternative tool for activation of hydrogen peroxide bleaching process / M. Hashem, M. El-Bisi, S. Sharaf, R. Refaie // Carbohydrate Polymers. – 2010. – Vol. 79(3). – P. 533–540. – doi: 10.1016/j.carbpol.2009.08.038.
8. Ali S. Integrated desizingebleachingereactive dyeing process for cotton towel using glucose oxidase enzyme / S. Ali, Z. Khatri, A. Khatri, A. Tanwari // Journal of Cleaner Production. – 2014. – Vol. 66. – P. 562–567. – doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.11.035.
9. Skalozubova N. Designing a composition formulation of surface active substances for the pretreatment of knitted fabric / N. Skalozubova, A. Kunik, O. Semeshko, Yu. Saribyekova, S. Myasnykov // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Technology organic and inorganic substances. – 2016. – Vol. 4/6(82). – P. 29–36. – doi: 10.15587/1729-4061.2016.75027.
10. Patent №115669 UA. MPK D06M 9/04 (2006/01). Kompozytsiia poverkhnevo-aktyvnykh rechovyn dlia pidhotovky bavovnianoho trykotazhnoho polotna / N.S. Skalozubova, O.Ia. Semeshko, Yu.H. Saribiekova (Ukraina). – № u 2016 10932. – Zaiavl. 31.10.2016 ; opubl. 25.04.2017, Biul. № 8. – 4 s.
11. Semeshko O. Optimization of preparation technology of a cotton knitted fabric by the method of mathematical planning / O. Semeshko, T. Asaulyuk, Yu. Saribyekova // Proceedigns of 2th International Conference [«EastWest Chemistry Conference»], (Lviv, October 10–12, 2018). – Lviv Polytechnic Natonal University, 2018. – P. 186.
12. Otdelka hlopchatobumazhnyh tkanej : v 2 ch. Ch. 1. Tehnologija i assortiment hlopchatobumazhnyh tkanej / [pod red. B.N. Mel'nikova]. – M. : Legkombytizdat, 1991. – 432 s.

Рецензія/Peer review : 7.11.2018 р. Надрукована/Printed :15.2.2019 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Валько М.І.

DOI 10.31891/2307-5732-2019-269-1-122-128
УДК 621.891

В.Г. КАПЛУН, В.А. ГОНЧАР, Т.В. ДОНЧЕНКО, П.В. МАТВІЇШИН
Хмельницький національний університет

ВПЛИВ ІОННОГО АЗОТУВАННЯ ТА ЗАЛИШКОВОГО АУСТЕНІТУ НА ДОВГОВІЧНІСТЬ СТАЛІ ПРИ ТЕРТІ КОЧЕННЯ

Досліджено довговічність при терті кочення в мастилі І-20 сталі Х12М. Випробовувалися на контактну витривалість зразки цієї сталі без термічної обробки, після гартування, з застосуванням хіміко-термічної технології іонного азотування в безводневих насичуючих середовищах та комплексної технології нітрогартування. Випробування проводилися при точковому та лінійному контактах. Досліджено вплив температури гартування сталі на вміст залишкового аустеніту в її структурі та на твердість основи в композиції «дифузійне покриття-основа». Встановлено, що контактна витривалість композиції «дифузійне покриття-основа» залежить від вмісту залишкового аустеніту в структурі сталі і зростає прямопропорційно до підвищення твердості основи.

Ключові слова: іонне азотування, довговічність, тертя кочення, твердість, покриття, основа.

P. V. KAPLUN, V.A. HONCHAR, T.V. DONCHENNKO, P.V. MATVIICHIN
Khmelnytskyi National University

NFLUENCE OF IONIC NITRIDING AND REMAININGAUSTENITE ON LONGEVITY PERMANENT AT FRICTION WOOBLING

The durability of gravity rolling in I-20 lubrication steel X12M is investigated. The samples of this steel, without heat treatment, after quenching, with the use of chemical-thermal ion nitriding technology in anhydrous saturated environments and the complex nitro-coagulation technology, were tested for contact durability. Tests were made at point and line contacts. The comparative tests of contact durability of samples show the prospect of applying anhydrous ionic nitrogen technology to increase the durability of structural elements from steel X12M with friction rolling. It was established that the durability of steel samples without heat treatment after ion nitriding in non-aqueous media is 50% higher than non-irradiated samples.. The durability of nitrogen samples after quenching from a temperature of 920°C is an order of magnitude higher than its value compared to samples without heat treatment due to high hardness. The highest durability of steel is after nitro-halting at a temperature of 930°C, which is 2,1times its value for tempered specimens.This is due to the alloying of steel with nitrogen and its compounds and high physical-mechanical properties and presence of residual compressive stresses. The influence of the tempering temperature on the content of residual austenite in its structure and the hardness of the base in the composition "diffusion coating-base" is investigated. It has been established that the contact durability of the "diffusion coating-base" composition depends on the content of residual austenite in the steel structure and increases directly in proportion to the increase of the hardness of the base.

Key words: ion nitriding, durability, rolling friction. hardness, coating, basis.

Вступ

В техніці велика кількість деталей машин і вузлів (підшипники кочення, колеса поїздів та кранів, зубчасті колеса, подавальні вальці, накатні ролики тощо) працюють при терті кочення. Підвищення їх довговічності є актуальною проблемою. Вихід з ладу більшості конструкційних елементів при цьому відбувається від викришення поверхні від втоми матеріалу. Дослідженням процесів контактної втоми при терті кочення присвячено багато праць [1–15], в більшості яких розглядається робота однорідних матеріалів [1–5], що мають певні обмежені можливості з підвищення контактної витривалості при коченні.

В основі явищ контактної втоми лежать ті ж процеси, що і при всякому іншому виді втоми [5, 7]. Разом з тим, в явищах втоми при змінному контактному навантаженні беруть участь і процеси, що не зустрічаються в інших видах втоми. До цих специфічних процесів втоми слід віднести явища тертя, зношування, окислення при терті, теплові процеси. Ці додаткові специфічні процеси можуть суттєво вплинути на процес контактної втоми. Втомне викришування і відшаровування робочих поверхонь кілець і тіл кочення обумовлюється результатом розвитку мікротріщин, що утворюються через повторні мікропластичні зсуви перенапруженого матеріалу. Втомні пошкодження локалізуються в місцях концентрації напружень на поверхні і в підповерхневих шарах. В більшості випадків руйнування починається з поверхні [8, 9]. Утворення підповерхневих тріщин, що зв'язані з контактною втомою металу при дії контактних напружень, спостерігається в матеріалів з неоднорідною структурою (азотованих, цементованих і з поверхневим гартуванням) і пояснюється додатковим впливом залишкових напружень [10, 11]. Великий влив на втому при змінному контактному навантаженні матеріалів має середовище і водень [12, 13, 15].

В даний час є велика кількість технологій для нанесення покриттів, кожна з яких має свої переваги і недоліки і забезпечує певні з названих вище факторів. Але немає однієї технології, що забезпечує всі ці фактори. Тому перспективним є застосування в технологічному процесі інтегральних технологій з використанням кількох одинарних технологій, які в комплексі забезпечують всі названі вище фактори. Найбільш поширеними в даний час для підвищення довговічності при змінному контактному навантаженні є технології ХТО – цементації та нітроцементації [6]. Але вони високотемпературні і застосовують водневомісткі насичуючі середовища, що негативно впливає на характеристики міцності і довговічності матеріалів. Альтернативою цим технологіям при підвищенні контактної витривалості деталей машин при терті кочення є застосування технології іонного азотування в безводневих насичуючих середовищах та комплексних технологій з її використанням.

Методика експериментальних досліджень.

Експериментальні дослідження довговічності при циклічному контактному навантаженні сталей проводилися на універсальній установці [16], що дозволяє проводити випробування зразків при терті кочення з точковим і лінійним контактами. Дослідження проводилися на торцевій поверхні плоских діаметром 40 мм зразках із сталі Х12М з дифузійними покриттями та без покриттів. Зразки мали різну термічну обробку та дифузійні покриття. Дифузійні покриття наносили методами іонного азотування в безводневих середовищах, а також за комплексною технологією нітрогартування. Іонне азотування проводилося за оптимальним режимом(температура дифузійного насичення Т = 570°С, тиск в вакуумній камері Р = 240 Па, насичуюче середовище 75об.%N_2+25об.%Ar, час дифузійного насичення τ = 480 хв), який забезпечує максимальну твердість та значну товщину азотованого шару. Оптимальний режим визначався методом планування експериментів (4-х факторний план Хартлі) [17], при якому технологічні параметри процесу азотування змінювалися в певних інтервалах (табл. 1). Технологія нітрогартування включала: іонне азотування в безводневому середовищі за оптимальним режимом; термоактивування при температурах гартування (від 900 до 1120°С табл.1) протягом 7 хв; гартування в мастилі з наступним відпуском при температурі 160°С протягом 90 хв. Перед випробуваннями зразки шліфувалися (Ra = 0,125 мкм). Тілами кочення були кульки діаметром 7,14 мм при точковому контакті, які мали твердість HRC 63 і рухалися по колу діаметром 30 мм. Випробування проводилися при максимальному тиску на площадці контакту 2140 МПа в середовищі мастила І-20 до появи пітингу на доріжках кочення. Дослідження впливу залишкового аустеніту та твердості основи на довговічність при коченні проводилися на зразках після нітрогартування від різних температур (табл. 2), які мали вміст залишкового аустеніту від 20 до 90% і, відповідно, твердість основи, що змінювалася в інтервалі від 7960 до 5280 МПа. Методами металографії визначалися структура, товщина і мікротвердість по товщині азотованого шару з використанням мікроскопів МІМ-9 і ПМТ-3. Фазовий склад на поверхні азотованих шарів визначали з використанням ДРОН-3М. Залишкові напруження стиску в азотованих шарах визначалися за методикою [13]. Вимірювання вмісту залишкового аустеніту в досліджуваних зразках проводилися за допомогою аустиномометра МАК-2М. Градієнт твердості по товщині азотованого шару є змінною величиною. Тому в дослідженнях для порівнянь застосовувалася його величина, що визначалася за формулою (1).

$$Grad = (H_{max} - H_o)/h, \quad (1)$$

де H_{max} – максимальна твердість в азотованому шарі в МПа; H_o – твердість основи в МПа; h – товщина азотованого шару в мкм.

Результати досліджень.

В табл. 1 наведені результати досліджень товщини та твердості азотованого шару після іонного азотування в безводневих середовищах сталі Х12М за різними режимами відповідно до плану Хартлі[17]. На основі одержаних даних отримані математичні залежності твердості (2) та товщини (3) азотованого шару від технологічних параметрів процесу азотування.

Таблиця 1

Залежність товщини та мікротвердості поверхні азотованого шару від режимів іонного азотування

№ режиму азотування	Значення факторів режиму азотування				Товщина азотованого шару h_n, мкм	мікротвердість поверхні H_{100}, МПа
	Т, °С	Р, Па	τ, хв.	об. % Ar, в суміші з азотом		
1	570	320	185	57	323	7360
2	510	320	185	57	252	6964
3	570	160	185	19	341	8106
4	510	160	185	19	218	7918
5	570	320	75	19	264	7750
6	510	320	75	19	169	6980
7	570	160	75	57	247	7759
8	510	160	75	57	172	6717
9	480	240	130	38	165	6530
10	600	240	130	38	342	9230
11	540	80	130	38	204	8380
12	540	400	130	38	290	6860
13	540	240	20	38	128	7625
14	540	240	240	38	312	6995
15	540	240	130	0	304	7050
16	540	240	130	76	293	6890
17	540	240	130	38	298	7800

$$H_{100}\,(\text{МПа}) = 9290 + 1200\,x_1 - 889\,x_2 - 471\,x_3 - 238\,x_4 - 2070\,x_1^2 - 469\,x_2^2 - 1940\,x_3^2 - 2340\,x_4^2 - 825\,x_1x_2 + 7\,x_1x_3 - 435\,x_1x_4 - 443\,x_2x_3 + 1630\,x_2x_4 + 48\,x_3x_4; \quad (2)$$

$$h_п\,(\text{мкм}) = 268 + 126\,x_1 + 65\,x_2 + 203\,x_3 - 35\,x_4 - 58\,x_1^2 - 58\,x_2^2 - 95{,}5\,x_3^2 - 58{,}0\,x_4^2 + 57{,}5\,x_1x_2 + 67{,}5\,x_1x_3 - 67{,}5\,x_1x_4 + 62{,}5\,x_2x_3 - 198{,}0\,x_2x_4 - 163{,}0\,x_3x_4, \quad (3)$$

де x_1, x_2, x_3, x_4– незалежні змінні величини (фактори), що визначаються відповідно методиці [17] в залежності від технологічних параметрів режиму азотування за формулами (4):

$$x_1 = \frac{(T-540)}{60};\ x_2 = \frac{(P-240)}{160};\ x_3 = \frac{(\tau-130)}{110};\ x_4 = \frac{(Ar-38)}{38}. \quad (4)$$

За отриманими формулами (1) і (2) можна визначити величини твердості а товщини азотованого шару для будь-якого режиму іонного азотування та визначити оптимальні режими азотування, що забезпечують максимальні значення цих характеристик. Використовуючи рівняння (1), отримано оптимальний режим іонного азотування (температура T = 570°C, тиск P = 240 Па, час дифузійного насичення τ = 480 хв, насичуюче середовище 75об.%N_2+25об.%Ar), що забезпечив максимальну мікротвердість азотованого шару (H_{100} = 9580 МПа) та значну товщину азотованого шару (h_n = 350 мкм). На рис. 1 показано вплив технологічних параметрів іонного азотування на твердість азотованого шару, з якого видно, що їх зміна дозволяє змінювати твердість поверхні в значних межах.

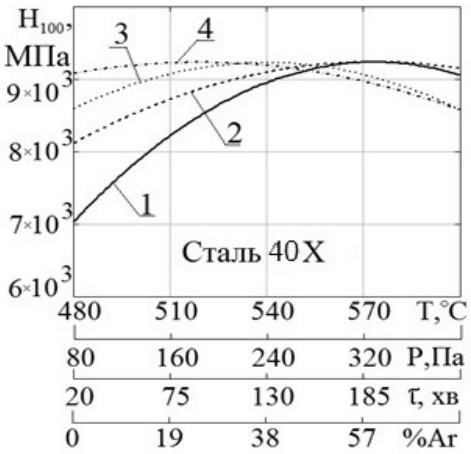
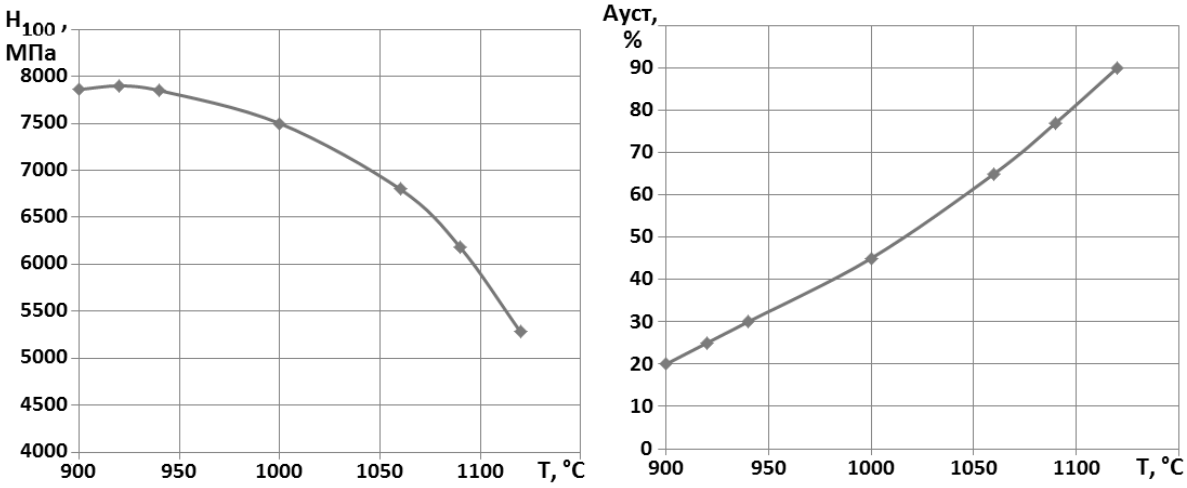


Рис. 1. Залежність твердості азотованого шару від технологічних параметрів іонного азотування сталі Х12М за оптимальним режимом: 1 – температури, Т, °С; 2 – тиску, Р, Па; 3 – часу дифузійного насичення, τ, хв.; 4 – вмісту Ar, %

Після гартування та нітрогартуванні сталі Х12М від різних температур в структурі матеріалу утворюється значна кількість залишкового аустеніту, яка зростає з підвищенням температури гартування і досягає 90% при температурі 1120°C. Це приводить, відповідно, до зменшення мікротвердості матеріалу від H_{100} = 8520 до 5280 МПа при гартуванні та від 9340 до 7230 МПа при нітрогартуванні рис. 2, табл. 2.



а б

Рис. 2. Вплив температури гартування сталі Х12М на мікротвердість поверхні (а) та вміст залишкового аустеніту (б) в структурі матеріалу

Таблиця 2

Кількість аустеніту та мікротвердість зразків після гартування

№ п/п	Температура гартування, °C	Кількість залишкового аустеніту до випробування, %	Мікротвердість зразка до випробування H_{100}, МПа
1	900	20	7860
2	920	25	7900
3	940	30	7850
4	1000	46	7500
5	1060	65	6800
6	1090	77	6180
7	1120	90	5280

В процесі нітрогартування в період термоактивування від температур гартування на протязі певного часу відбувається розпад вищих нітрид них фаз на нижчі та дифузія їх всередину металу, що викликає перерозподіл концентрації азоту в азотованому шарі, зменшення твердості поверхні по глибині покриття (табл. 3) та збільшення його товщини (табл. 4).

Таблиця 3

Вміст азоту та фазовий склад в азотованому шарі сталі Х12 після іонного азотування та нітрогартування за оптимальним режимом

№ шару	Товщина послідовно вилученого шару, мкм	Сумарна величина вилученого шару, мкм	Вміст азоту в шарі по масі, %		Фази на поверхні	
			після азотування	після нітрогартування	після азотування	після нітрогартування
1	0	0	8.45	7,40	$\varepsilon + \gamma + \alpha\text{-Fe}_{[N]}$	$\gamma + \alpha\text{-Fe}_{[N]}$
2	5	5	7,95	7,35	$\varepsilon + \gamma + \alpha\text{-Fe}_{[N]}$	$\gamma + \alpha\text{-Fe}_{[N]}$
3	10	15	4,18	5,24	$\gamma + \alpha\text{-Fe}_{[N]}$	$\gamma + \alpha\text{-Fe}_{[N]}$
4	10	25	2,91	3,39	$\gamma + \alpha\text{-Fe}_{[N]}$	$\gamma + \alpha\text{-Fe}_{[N]}$
5	20	45	1,65	2,12	$\gamma + \alpha\text{-Fe}_{[N]}$	$\gamma + \alpha\text{-Fe}_{[N]}$
6	30	75	0.35	0,75	$\alpha\text{-Fe}_{[N]}$	$\gamma + \alpha\text{-Fe}_{[N]}$
7	30	105	0,17	0,20	$\alpha\text{-Fe}_{[N]}$	$\alpha\text{-Fe}_{[N]}$
8	60	165	0,12	0,15	$\alpha\text{-Fe}_{[N]}$	$\alpha\text{-Fe}_{[N]}$
9	60	225	0,08	0,10	$\alpha\text{-Fe}_{[N]}$	$\alpha\text{-Fe}_{[N]}$
10	60	285	0,006	0,008	$\alpha\text{-Fe}_{[N]}$	$\alpha\text{-Fe}_{[N]}$
11	60	345	0,004	0,006	$\alpha\text{-Fe}_{[N]}$	$\alpha\text{-Fe}_{[N]}$

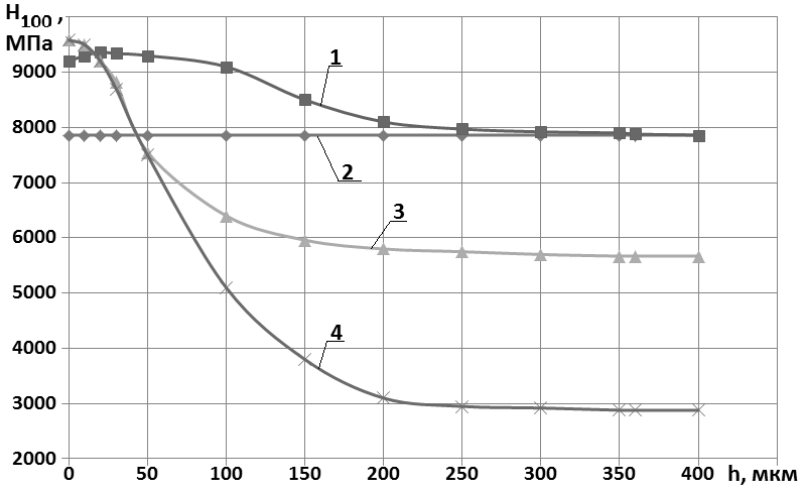


Рис. 3. Розподіл мікротвердості по товщині азотованого шару при: 1 – нітрогартуванні, 2 – гартуванні, 3 – азотуванні після гартування, 4 – азотуванні сталі без термообробки

Таблиця 4

Властивості азотованого шару сталі Х12М після іонного азотування та нітрогарування від різних температур за оптимальним режимом

№ п/п	Вид термічної та хіміко-термічної обробки	Мікротвердість H_{100}, МПа		Товщина покриття $h_п$, мкм	Градієнт твердості МПа/мкм	Залишкові напруження, $\sigma_з$, МПа
		поверхні	основи			
1	азотування без термообробки	9580	2800	350	19,65	629
2	гартування від920°С +азотування,	9580	5670	357	11,23	615
3	нітрогартування від 900°С	9250 max	7930	357	3,13	530
4	нітрогартування від 920°С	9340 max	7860	357	3,30	480
5	нітрогартування від 940°С	9300 max	7720	360	3,55	450
6	нітрогартування від 1000°С	8680max	7660	360	2,27	370
7	нітрогартування від1060°С	8160 max	7270	362	2,45	285
8	нітрогартування від 1090°С	7860 max	6320	365	4,21	260
9	нітрогартування від 1120°С	7120 max	5280	366	5,02	250
10	гартування від 920°С	7860	7860	–	-–	–

На рис. 3 наведені графіки розподілу мікротвердості по товщині азотованого шару від температури при азотуванні, гартуванні та нітрогартуванні. З рисунка видно, що при нітрогартуванні твердість поверхні нижча, а товщина азотованого шару та твердість основи більші в порівнянні з азотуванням. Це зумовлює значне зменшення градієнта твердості по товщині азотованого шару при нітрогартуванні від температури 920°С, що менший в 6 разів в порівнянні з азотуванням сталі без термообробки та в 3,4 рази менший в порівнянні з її азотуванні після гартування (табл. 4).

В табл. 4 наведені фізико-механічні властивості азотованого шару сталі Х12М після різних видів термічної та хіміко-термічної обробок. З таблиці видно, що після іонного азотування сталі без термічної обробки отримано азотований шар високої твердості на поверхні при малій твердості основи, великі залишкові напруження стиску та високий градієнт твердості по глибині азотованого шару. Іонне азотування після попереднього гартування сталі приводить до більшої твердості основи в порівнянні з азотованою сталлю без термообробки. Це привело до зменшення градієнта твердості по глибині покриття. При нітрогартуванні сталі від різних температур відбувається зменшення твердості поверхні азотованого шару та основи, зниження залишкових напружень та значне зменшення грієнта твердості по глибині покриття. Ці властивості композиції «азотоване покриття-основа» мають значний вплив на довговічність сталі при терті кочення.

В табл. 5 та на рис. 4 наведені результати випробувань на довговічність при терті кочення зразків гартованої та нітрогартованої сталі Х12М з різним вмістом залишкового аустеніту. З таблиці видно, що при гартуванні максимальну довговічність $25{,}53 \cdot 10^6$ циклів мали зразки з вмістом в структурі сталі 30% залишкового аустеніту, при якому була максимальна твердість матеріалу При збільшенні залишкового аустеніту відбувається значне зменшення довговічності зразків і при вмісті залишкового аустеніту 90% вона складала всього $10{,}28 \cdot 10^6$ циклів навантаження, що в 2,5 рази менше в порівнянні з максимальним значенням. При нітрогартуванні залежність довговічності від вмісту легованого азотом залишкового аустеніту в поверхневому шарі аналогічна. Максимальна довговічність зразків $47{,}26 \cdot 10^6$ та мінімальна $21{,}28 \cdot 10^6$ циклів навантаження досягаються відповідно при 30% та 90% вмістах залишкового аустеніту в сталі, що в 2,2 рази менше в порівнянні з максимальним значенням. В процесі циклічного навантаження при коченні відбувається деформування поверхневих шарів матеріалу, що приводить до розпаду залишкового аустеніту і перетворення його в мартенсит. Це викликає підвищення твердості деформованих шарів матеріалу і тим більше, чим більше було мартенситного перетворення. Вплив мартенситного перетворення на підвищення твердості та довговічності при терті кочення можна оцінювати з допомогою коефіцієнта повноти мартенситного перетворення $К_м$ (відношення кількості остаточного аустеніту, що розпався, до його початкового значення), які зростають з його підвищенням. Для сталі Х12М після гартування $К_м$ = 0,28 – 0,3, а після нітрогартування $К_м$ = 0,37 – 0,4. В процесі мартенситного перетворення відбувається часткове поглинання енергії деформування, що разом з підвищенням твердості деформованого шару сприяє підвищенню довговічності сталі.

Це дозволяє прийти до висновку, що на довговічність зразків із сталі Х12М з структурою залишкового аустеніту при терті кочення впливають не тільки зміна мікротвердості поверхні зразка та кількість залишкового аустеніту, що розпався, але й здатність матеріалу до релаксації мікронапружень та розсіювання енергії.

Таблиця 5

Результати випробувань на довговічність зразків із сталі Х12М після гартування та нітрогартування з різним вмістом залишкового аустеніту

№ п/п	Кількість залишкового аустеніту до випробування, об.%	Мікротвердість до випробування H_{100}, МПа		Мікротвердість доріжки кочення після випробувань H_{100}, МПа	Кількість залишкового аустеніту, що розпався, об.%	Довговічність зразка, $N \cdot 10^6$циклів
		поверхні	основи			
гартування						
1	20	7860	7860	7940	6	25,51
2	25	7980	7980	8160	8	27,32
3	30	7960	7960	8190	9	27,53
4	45	7600	7600	7770	15	25,25
5	65	6800	6800	7000	20	20,66
6	80	6000	6000	6220	24	16,3
7	90	5280	5280	5520	28	12,28
нітрогартування						
8	20	9250	7860	9330	8	46,22
9	25	9360	7980	9480	10	48,26
10	30	9350	7960	9520	12	49,37
11	45	9100	7600	9360	17	48,41
12	65	8460	6800	8950	26	41,19
13	80	7760	6000	8460	31	32,62
14	90	7230	5280	8000	35	24,54

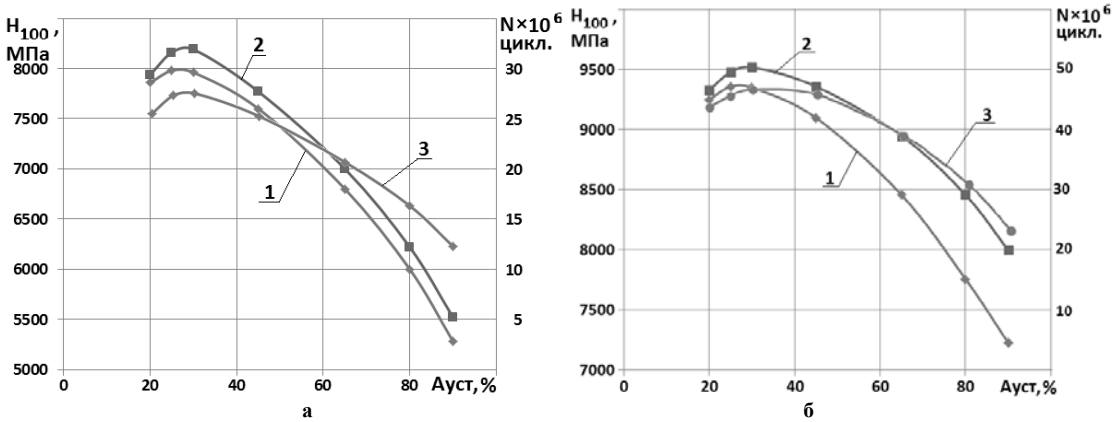


Рис. 4. Залежність довговічності зразків із сталі Х12М після гартування (а) та нітрогартування (б) з різним вмістом залишкового аустеніту: 1 – мікротвердість до випробувань; 2 – мікротвердість після випробувань; 3 – довговічність

В таблиці 6 наведені результати порівняльних випробувань на довговічність при терті кочення зразків сталі Х12М при різних видах термічної та хіміко-термічної обробок. Випробування показали, що довговічність зразків без термічної обробки після іонного азотування на 50% вища, а після азотування з попереднім гартуванням в 9,3 рази більша в порівнянні з не азотованою сталлю. Довговічність цієї сталі після нітрогартування в 1,8–2,1 рази більша в порівнянні з гартованими зразками. Це обумовлено легуванням сталі азотом та його сполуками (табл. 3) і вищими фізико-механічними властивостями та наявністю залишкових напружень стиску (табл. 5) в поверхневому шарі. Крім того насичення аустеніту азотом сповільнює рух дислокацій, утворення і ріст мікротріщин. Все це приводить до значного підвищення довговічності сталі після нітрогартування.

Таблиця 6

Результати порівняльних випробувань на довговічність при терті кочення зразків сталі Х12М при різних видах термічної та хіміко-термічної обробок (тиск на площадці контакту 2140 МПа)

№ п/п	Вид термічної та хіміко-термічної обробки	Мікротвердість H_{100}, МПа		Товщина покриття $h_п$, мкм	Градієнт твердості МПа/мкм	Довговічність зразка, $N\times10^6$циклів
		поверхні	основи			
1	без термообробки	2800	2800	–	–	2,83
2	азотування без термообробки	9580	2800	350	19,65	2,75
3	гартування від 920°С	7860	7860	–	–	24,72
4	гартування від 920°С +азотування	9580	5670	357	11,23	25,54
5	нітрогартування від 920°С	9360	7900	357	3,30	46,76

Висновки

Іонне азотування в безводневих середовищах змінює фізико-механічні характеристики, фазовий склад та залишкові напруження стиску в широких межах, які можна оптимізувати за певними критеріями, що має значний вплив на довговічність сталі при терті кочення.

При гартуванні сталі Х12М від різних температур в її структурі утворюється різна кількість залишкового аустеніту (від 20 до 90%), яка має великий вплив на її довговічність. В процесі циклічного навантаження при коченні відбувається деформування поверхневих шарів матеріалу, що приводить до розпаду залишкового аустеніту і перетворення його в мартенсит. Це сприяє підвищенню твердості поверхні та контактної витривалості матеріалу.

Встановлено, що при різних видах термічної та хіміко-термічної обробок найвища довговічність при терті кочення досягається при технології нітрогартування, яка в 1,8–2,1 рази більша в порівнянні з гартованими зразками.

Це обумовлено: легуванням сталі азотом, що сповільнює рух дислокацій та утворення і ріст мікротріщин; великою твердістю основи; високими фізико-механічними властивостями азотованого шару; малим градієнтом твердості по товщині та наявністю залишкових напружень стиску в поверхневому шарі.

Література

1. Ковальский Б. С. Расчет деталей на местное сжатие / Ковальский Б. С. –Харьков : ХВКИУ, 1967. – 222 с.

2. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия / [пер. с англ. В.Э. Наумова, А.А. Спектора].

– М. : Мир, 1989. – 510 с.

3. Пинегин С. В. Работоспособность деталей подшипников / Пинегин С. В. – М. : Машгиз, 1949. –168 с.

4. Перель, Л.Я. Подшипники качения: Расчет, проектирование и обслуживание опор : справочник / М. : Машиностроение, 1983. – 543 с.

5. Трубин Г.К. Контактная усталость материалов для зубчатих калес / Трубин Г.К. – М. : Машгиз, 1962. – 403 с.

6. Зинченко В.М. Инженерия поверхности зубчатих колес методами химико-термической обработки / Зинченко В.М. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 303 с.

7. Сосновский Л. А. О развитии представлений об усталости металлов при объемном нагружении и трении / Л. А. Сосновский, Н. А. Махутов, В. Т. Трощенко // Тр. VI-го Международного симпозиума по трибофатике (ISTF 2010), 25 октября - 1 ноября 2010 г., Минск (Беларусь). – Минск : БГУ, 2010. – Т. 1. – С. 77-84.

8. Грозин Б.Д. Износ в зубчатых передачах / Б.Д. Грозин, Б.И. Костецкий // Вестник машиностроения. – 1947. – № 12. – 236 с.

9. Осипян А.В. Экспериментальное исследование питтинговых разрушений в зубчатых передачах / А.В. Осипян // Труды НАТИ. – Машгиз, 1945. – Вып. 43. – 215 с.

10. Пинегин С.В. Контактная прочность и сопротивление качению / Пинегин С.В. – М. : Машиностроение, 1969. – 245 с.

11. Каплун П. В. Визначення залишкових напружень в азотованих шарах після іонного азотування за показниками мікротвердості / П. В. Каплун, Б. А. Ляшенко // Проблеми міцності. – 2016. – № 6. – С. 56–63.

12. Каплун П.В. Контактна витривалість сталі 40Х в різних середовищах після іонного азотування та нітрогартування / П.В. Каплун, О.В. Диха, В.А. Гончар // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – Львів, 2017. – № 4. – С. 42–47.

13. Похмурський В.І. Корозійна втома металів і сплавів / Похмурський В.І., Хома М.С. – Львів : СПОЛОМ, 2008. – 304 с.

14. Каплун П. В. Підвищення зносостійкості та довговічності підшипників кочення іонним азотуванням / П. В. Каплун, Б. А. Ляшенко // Проблеми трибології. – 2016. – № 2. – С. 15–20.

15. Каплун П.В. Вплив водню на контактну витривалість сталей при іонному азотуванні / П.В. Каплун // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – Львів, 2017. – № 6. – С. 68–72.

16. Патент № 106181 UA. МПК (2006.01):G01L 1/00. Спосіб випробувань на контактну витривалість при коченні з проковзуванням / Каплун П.В., Гончар В.А., Паршенко А.В. – Опубліковано 25.04.2016, бюл. № 8.

17. Красовский Г.И. Планирование эксперимента / Красовский Г.И., Филаретов Г.Ф. – Минск : Изд. БГУ, 1982. – 302 с.

References

1. Koval'skij B. S. Raschet detalej na mestnoe szhatie / Koval'skij B. S. –Har'kov : HVKIU, 1967. – 222 s.

2. Dzhonson K. Mehanika kontaktnogo vzaimodejstvija / [per. s angl. V.Je. Naumova, A.A. Spektora]. – M. : Mir, 1989. – 510 s.

3. Pinegin S. V. Rabotosposobnost' detalej podshipnikov / Pinegin S. V. – M. : Mashgiz, 1949. –168 s.

4. Perel', L.Ja. Podshipniki kachenija: Raschet, proektirovanie i obsluzhivanie opor : spravochnik / M. : Mashinostroenie, 1983. – 543 s.

5. Trubin G.K. Kontaktnaja ustalost' materialov dlja zubchatih kales / Trubin G.K. – M. : Mashgiz, 1962. – 403 s.

6. Zinchenko V.M. Inzhenerija poverhnosti zubchatih koles metodami himiko-termicheskoj obrabotki / Zinchenko V.M. – M. : Izd-vo MGTU im. N.Je. Baumana, 2001. – 303 s.

7. Sosnovskij L. A. O razvitii predstavlenij ob ustalosti metallov pri ob#emnom nagruzhenii i trenii / L. A. Sosnovskij, N. A. Mahutov, V. T. Troshhenko // Tr. VI-go Mezhdunarodnogo simpoziuma po tribofatike (ISTF 2010), 25 oktjabrja - 1 nojabrja 2010 g., Minsk (Belarus'). – Minsk : BGU, 2010. – T. 1. – S. 77-84.

8. Grozin B.D. Iznos v zubchatyh peredachah / B.D. Grozin, B.I. Kosteckij // Vestnik mashinostroenija. – 1947. – № 12. – 236 s.

9. Osipjan A.V. Jeksperimental'noe issledovanie pittingovyh razrushenij v zubchatyh peredachah / A.V. Osipjan // Trudy NATI. – Mashgiz, 1945. – Vyp. 43. – 215 s.

10. Pinegin S.V. Kontaktnaja prochnost' i soprotivlenie kacheniju / Pinegin S.V. – M. : Mashinostroenie, 1969. – 245 s.

11. Kaplun P. V. Vyznachennia zalyshkovykh napruzhen v azotovanykh sharakh pislia ionnoho azotuvannia za pokaznykamy mikrotverdosti / P. V. Kaplun, B. A. Liashenko // Problemy mitsnosti. – 2016. – № 6. – C. 56–63.

12. Kaplun P.V. Kontaktna vytryvalist stali 40Kh v riznykh seredovyshchakh pislia ionnoho azotuvannia ta nitrohartuvannia / P.V. Kaplun, O.V. Dykha, V.A. Honchar // Fizyko-khimichna mekhanika materialiv. – Lviv, 2017. – № 4. – S. 42–47.

13. Pokhmurskyi V.I. Koroziina vtoma metaliv i splaviv / Pokhmurskyi V.I., Khoma M.S. – Lviv : SPOLOM, 2008. – 304 s.

14. Kaplun P. V. Pidvyshchennia znosostiikosti ta dovhovichnosti pidshypnykiv kochennia ionnym azotuvanniam / P. V. Kaplun, B. A. Liashenko // Problemy trybolohii. – 2016. – № 2. – S. 15–20.

15. Kaplun P.V. Vplyv vodniu na kontaktnu vytryvalist stalei pry ionnomu azotuvanni / P.V. Kaplun // Fizyko-khimichna mekhanika materialiv. – Lviv, 2017. – № 6. – S. 68–72.

16. Patent № 106181 UA. MPK (2006.01):G01L 1/00. Sposib vyprobuvan na kontaktnu vytryvalist pry kochenni z prokovzuvanniam / Kaplun P.V., Honchar V.A., Parshenko A.V. – Opublikovano 25.04.2016, biul. № 8.

17. Krasovskyi H.Y. Planyrovanye eksperimenta / Krasovskyi H.Y., Fylaretov H.F. – Minsk : Izd. BHU, 1982. – 302 s.

Рецензія/Peer review : 20.01.2019 р. Надрукована/Printed :21.02.2019 р.
Стаття рецензована редакційною колегією

РАДІОТЕХНІКА, ЕЛЕКТРОНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

DOI 10.31891/2307-5732-2019-269-1-129-136
УДК 004.522

А.А. МЯСИЩЕВ
Хмельницкий национальный университет

ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛЕТНОГО КОНТРОЛЛЕРА CC3D С ПРОШИВКОЙ INAV

Разработан беспилотный летательный аппарат (БЛА) на базе полетного контроллера cc3d с встроенным гироскопом и акселерометром, 3-осевого компаса HMC5883L, барометра/высотомера BMP180, GPS приемника u-blox NEO-6M. В качестве прошивки использована INAV ver.1.7.2, поддерживающая навигационные функции. В качестве рамы используется четырехмоторный мультиротор – квадрокоптер. Спроектированный квадрокоптер способен выполнять следующие полетные режимы: ANGLE – автоматическое выравнивание крена и тангажа с контролем угла горизонта, заданное значение которого не может превышаться, чем достигается устойчивый полет. Здесь задействованы гироскоп и акселерометр для удержания горизонта. NAV ALTHOLD – удержание высоты. Здесь использован барометр, который способствует удержанию высоты по давлению воздуха. NAV POSHOLD – удержание позиции. Использует GPS. NAV RTH (Return To Home) — возврат домой, в точку взлета. Контроллер запоминает точку, где произведен Arming и позволяет вернуть БЛА в эту точку. Failsafe RTH — режим спасения, который отправляет БЛА домой (в точку, где произведен запуск двигателей – Arming) в случае потери связи с наземной станцией. AIR MODE – режим динамической регуляции PID регулятора, который обеспечивает полную коррекцию PID во время нулевого дросселя и дает возможность плавного полета и выполнения высшего пилотажа. Показана возможность использования программы STM32 Flash loader demonstrator в качестве программатора для замены прошивки в cc3d с OpenPilot на INAV, а также возможность ее использование для обратного возврата на прошивку OpenPilot(LibrePilot) при прошивке начального загрузчика OpenPilot(LibrePilot) с последующей прошивкой OpenPilot(LibrePilot) с помощью LibrePilot GCS. Установлено для прошивки INAV при резком увеличении дроссельной заслонки коптер, взмывая вверх, теряет устойчивость и заваливается на левую или правую сторону. Если не убавить газ и не регулировать стиками выравнивание по Roll, Pitch, коптер падает. При плавном увеличении дроссельной заслонки коптер сохраняет устойчивость при подъеме вверх. Только тщательный подбор моторов и пропеллеров позволяет устойчиво коптеру подниматься вверх при резком увеличении газа. Таким образом PID - регуляторы прошивки INAV ver.1.7.2 на контроллере cc3d плохо работают с резкими отклонениями стиков, что приводит к аварии коптера. На прошивке OpenPilot(LibrePilot) с контроллером cc3d этого не наблюдается.

Ключевые слова: cc3d, PID-регулятор, INAV, LibrePilot, GPS приемник, AIR MODE, STM32F1, Throttle PID Attenuation.

A.A. MYASISCHEV
Khmelnytsky National University

OPPORTUNITIES OF FLIGHT CONTROLLER CC3D WITH INAV FIRMWARE

An unmanned aerial vehicle (UAV) based on a flight controller cc3d with a built-in gyroscope and accelerometer, 3-axis compass HMC5883L, barometer / altimeter BMP180, GPS receiver u-blox NEO-6M was developed. The firmware used is INAV ver.1.7.2, which supports navigation functions. Four motorized multirotor - quadrocopter is used as a frame. The designed quadcopter is able to perform the following flight modes: ANGLE - automatic levelling of the pitch and pitch with control of the angle of the horizon, the set value of which cannot be exceeded, thus achieving stable flight. Here a gyroscope and an accelerometer are used to hold the horizon. NAV ALTHOLD - hold height. Here a barometer is used, which helps to maintain the height of the air pressure. NAV POSHOLD - position is held. Uses GPS. NAV RTH (Return To Home) - return home to the take-off point. The controller remembers the point where Arming is produced and allows you to return the UAV to this point. Failsafe RTH - rescue mode, which sends the UAV home (to the point where the engines were started - Arming) in case of loss of communication with the ground station. AIR MODE is a mode of dynamic regulation of the PID regulator, which provides full PID correction during zero throttle and enables smooth flight and aerobatic flying. The possibility of using the STM32 Flash loader demonstrator program as a programmer to replace the firmware in cc3d from OpenPilot to INAV is shown. And also the ability to use it to return to the OpenPilot (LibrePilot) firmware when flashing the OpenPilot (LibrePilot) bootloader with subsequent OpenPilot (LibrePilot) firmware using the LibrePilot GCS. It is established for INAV firmware, that with a sharp increase in the throttle, the rotor, soaring upwards, loses stability and falls to the left or right side. If you do not turn down the gas and do not adjust the alignment of Roll, Pitch, the copter drops. With a smooth increase in the throttle, the copter remains steady when it rises up. Only a careful selection of engines and propellers allows the steadily steaming upward with a sharp increase in gas. Thus, the PID regulators of the INAV ver.1.7.2 firmware on the cc3d controller do not work well with sharp deviations of sticks, which leads to a crash of the copter. This is not observed on the OpenPilot (LibrePilot) firmware with the cc3d controller.

Keywords: cc3d, PID controller, INAV, LibrePilot, GPS receiver, AIR MODE, STM32F1, Throttle PID Attenuation.

Постановка задачи

В настоящее время большой интерес представляют беспилотные летающие роботы, построенные на базе мультироторов. Среди них наибольшее распространение имеют квадрокоптеры (4 мотора). Важную роль здесь имеют полетные контроллеры с установленной в них прошивкой (программным обеспечением). Причем аппаратно одинаковые полетные контроллеры могут работать под управлением разных прошивок. Известно, что полётный контроллер – электронное устройство, управляющее полётом летательного аппарата. Термин применяется к беспилотным летательным аппаратам, а, например, к пилотируемым

летательным аппаратам обычно употребляется термин автопилот. Чаще всего термин полётный контроллер относится к управляющим устройствам мультикоптеров.

К функциям полётного контроллера относятся стабилизация аппарата в воздухе; удержание высоты при помощи барометрического высотомера или иных датчиков и позиции при помощи GPS; автоматический полёт по заданным заранее точкам; передача на землю текущих параметров полёта с помощью модема; обеспечение безопасности полёта (возврат в точку взлета при потере сигнала, автопосадка); остановка перед препятствием (для мультикоптеров) или облет препятствий (для самолетов) при наличии датчиков; подключение дополнительной периферии: OSD (On Screen Display – меню на экране), светодиодной индикации и прочего.

Количество функций полетного контроллера зависит от наличия на борту мультикоптера соответствующей периферии. В работе [1] отмечалось, что в настоящее время разработано большое количество полетных контроллеров с программным обеспечением. Это Multiwii, ArduCopter (APM 2.6, APM 2.8, PixHawk), контроллеры DJI (Naza-M Lite, DJI Naza-M V2, DJI Wookong), MicroKopter, Zero UAV X4/X6, AutoQuad, KK, XAircraft и др. Причем далеко не все из них имеют функционал, перечисленный выше. Рассмотрим особенности полетного контроллера CC3D с прошивкой INAV.

Изложение основного материала работы

CC3D (CopterControl3D) [2] это 32-битный полётный контроллер, который был разработан под проект OpenPilot для небольших беспилотных летательных аппаратов (БЛА, UAV), включая мультироторные аппараты, вертолеты и самолеты. В 2015 году после того, как команда OpenPilot прекратила поддержку полётных контроллеров CC3D был запущен новый проект для поддержки CC3D – LibrePilot [3]. В сентябре 2016 году появилась обновленная версия LibrePilot, которая работала с новым более мощным полетным контроллером Sparky2 на микроконтроллере STM32F4 и поддерживала большее количество датчиков, в частности магнитометр, GPS приемник, барометр MS5611 и др. Прошивка LibrePilot достаточно стабильно управляет квадрокоптерами, построенными на рамах 250/300 размера, но имеет недостаток – недостаточно развитые навигационные функции, например отсутствие полета по точкам. А для малых полетных контроллеров типа CC3D, NAZE32, основанных на микроконтроллерах STM32F1, – отсутствие функций удержания высоты и позиции, не говоря о функции "возврата домой". Среди существующих проектов, можно выделить проект INAV [4], который ориентирован на микроконтроллеры семейства STM32 с поддержкой навигационных функций.

INAV является ответвлением известного проекта Cleanflight [5] с акцентом на функции GPS для самолетов и мультироторных моделей. INAV активно развивается и в настоящее время поддерживает режимы RTH (Return To Home) с предопределенной высотой набора высоты, удержание позиции, полет по путевым точкам, режим "Следуй за мной"(Follow-Me) и другие. Поддерживается большое количество недорогих плат полетных контроллеров. Следует отметить, что платы управления полетом Naze32 и CC3D еще работают, но с ограниченными функциями. Однако для использования всех INAV функций необходимо использовать платы с микроконтроллерами STM32F3 и STM32F4 [6]. Полетные контроллеры на базе STM32F1, такие как Naze32 и CC3D, современными прошивками больше не поддерживаются, однако ранее выпущенные прошивки все еще работают – последний релиз для плат STM32F1 – это INAV 1.7.3. Рассмотрим отличие полетных контроллеров на микроконтроллерах F1 (STM32F103CBT6), F3 (STM32F303CCT6) (рис. 1):

Рис. 1. STM32 F1, F3, F4 в полетных контроллерах

- Одна и та же частота (72 МГц), но более быстрые операции с плавающей запятой у F3, благодаря отдельному модулю операций с плавающей запятой (математический сопроцессор FPU).
- Дополнительный свободный UART порт (COM-порт), у F3 их 3, F1 имеет 2 порта. CC3D позволяет использовать только 1 порт UART, например, для подключения GPS приемника. Второй UART задействован как шина I2C, к которой в данной работе подключены магнитометр и барометр. Поэтому возможно для F1 использование лишь одного UART.
- У всех последовательных портов в F3 имеется аппаратный инвертор сигнала, т.е. любой порт можно использовать с SBUS или SmartPort безо всяких модификаций.

За счет FPU F3 работает значительно быстрее, чем F1 при использовании PID контроллера на

математике с плавающей запятой, что важно для скоростных акробатических квадрокоптеров. Большим недостатком F1 является малая флешь память, где размещается прошивка. Она равна 128 КБайт. У F3 – 256 КБайт. Прошивка с использованием функций навигации занимает много памяти. Поэтому для более развитых прошивок с навигацией используют F4 с объемом флешь памяти 1 МБайт.

Особенностью прошивки INAV является возможность динамически регулировать усиление PID, поэтому высокий дроссель (ускоренный полет вперед или быстрый набор высоты) не вызывает высокочастотных колебаний квадрокоптера, характерных для высоких значений составляющей P в PID регуляторе. Для этого вводится параметр TPA [Throttle PID Attenuation]. TPA обеспечивает уменьшение значения PID по отношению к полному дросселю. Он используется для гашения значений PID при достижении полного газа. Численно TPA равен проценту гашения, которое будет иметь место при полном открытии дроссельной заслонки. TPA Breakpoint – точка на кривой газа, с которой начнет применяться TPA. Ниже этой точки TPA не используется. Например, если возникают колебания, начинающиеся с 3/4 дросселя, необходимо установить TPA Breakpoint = 1750 или ниже (предполагается, что диапазон изменения дросселя составляет 1000-2000), а затем медленно необходимо увеличить TPA, пока колебания квадрокоптера не исчезнут. На рисунке 2 показан пример мультироторной кривой TPA.

Для динамической регуляции усиления PID очень важно установить режим AIRMODE. В стандартном режиме уменьшения дроссельной заслонки, когда рассчитываются крен, шаг и рыскание, все двигатели будут уменьшать обороты одинаково. При развороте некоторые двигатели могут даже отключаться. Это приводит к уменьшению усиления PID регулятора. Поэтому при резком снижении квадрокоптера, резких поворотов из-за уменьшения воздействия PID регулятора на стабилизацию полета квадрокоптер падает. Airmode обеспечит полную коррекцию PID во время нулевого дросселя и дает возможность плавного полета и выполнения высшего пилотажа.

Выше было отмечено, что полетные контроллеры cc3d evo поставляются с прошивкой OpenPilot (LibrePilot). Для использования прошивки INAV cc3d необходимо перепрошить. Прошивка поставляется файлом с расширением .hex, поэтому начальный загрузчик LibrePilot теряется и его при обратном переходе к LibrePilot необходимо восстановить с использованием программатора. В работе стоит задача построения квадрокоптера, который должен уметь удерживать высоту по барометру, позицию по GPS приемник и возвращаться домой. Исходными данными являются:

1. Рама f450
2. Четыре пропеллера 10x45
3. Полетный контроллер cc3d evo с гироскопом и акселерометром
4. Компас HMC5883L и барометр BMP180 на шине I2C
5. GPS приемник GY-GPS6MV2(GY-NEO6MV2)
6. Батарея Li-po 3S1P 4200mAh

Для решения задачи копируется прошивка INAV ver. 1.7.2 с сайта https://github.com/iNavFlight/inav/releases/tag/1.7.2, а конфигуратор inav ver. 1.7.3 – https://github.com/iNavFlight/inav-configurator/releases/tag/1.7.3

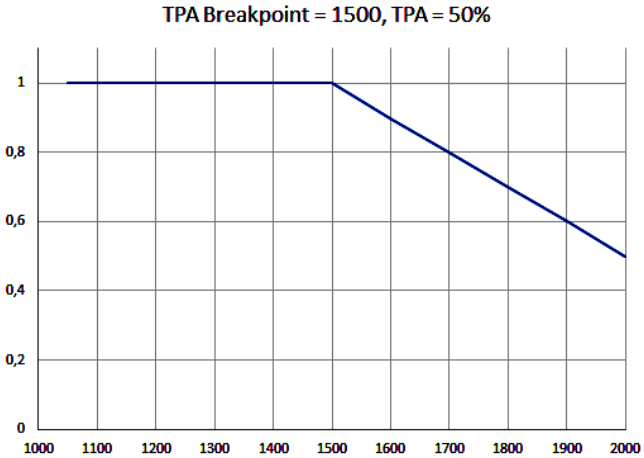


Рис. 2. Пример мультироторной кривой TPA

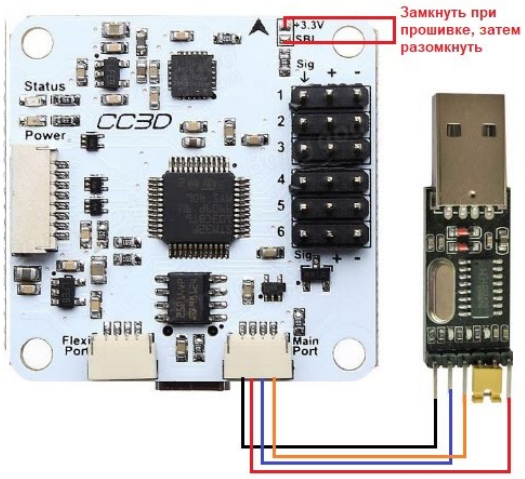


Рис. 3. Подключение cc3d при программировании

Для контроллера cc3d (с микроконтроллером STM32F1) версия прошивки 1.7.3. является последней. Здесь выбрана версия 1.7.2. Для прошивки cc3d используется программа STM32 Flash loader demonstrator с сайта https://www.st.com/en/development-tools/flasher-stm32.html. Для прошивки используется подключение cc3d к USB компьютера через конвертер USB to TTL на базе микросхемы CH340 (рис. 3).

Для правильной работы программы STM32 Flash loader demonstrator необходимо вначале вставить в порт USB компьютера конвертер, а затем подключить его к cc3d через порт Main Port. После запуска программы STM32 Flash loader demonstrator необходимо выполнить последовательность действий в соответствии с рисунком 4 и далее правильно отвечая на вопросы при работе программатора [14].

После успешной прошивки отключается конвертер CH340 от cc3d и размыкается замкнутый контакт (рис. 3). На компьютере устанавливается конфигуратор INAV ver.1.7.3 и cc3d подключается к компьютеру через порт mini USB. После нажатия на кнопку Connect на конфигураторе должно появиться

изображение, как на рис. 5.

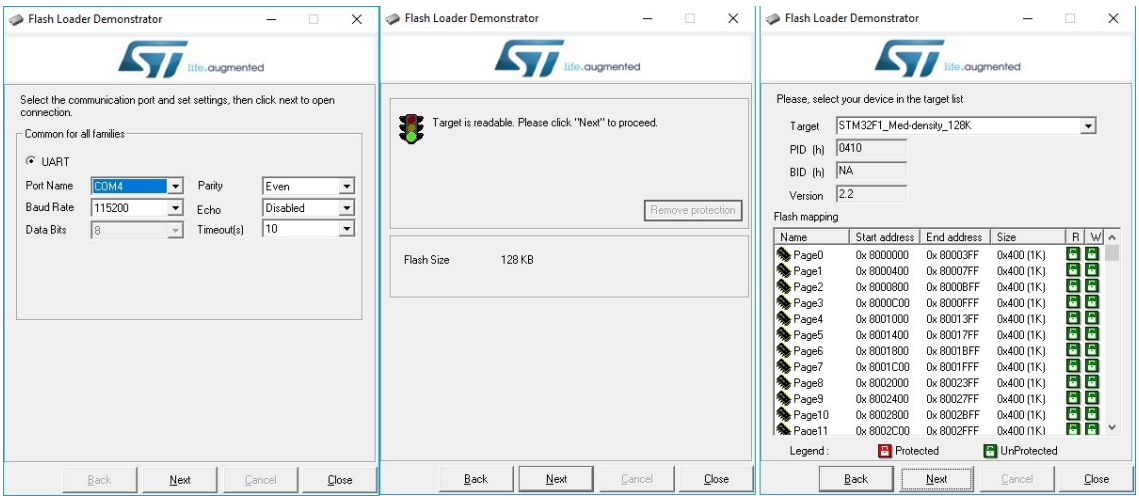


Рис. 4. Работа с STM32 Flash loader demonstrator (выбор com порта, успешное подключение к cc3d и идентификация контроллера STM32F1 с flash 128K)

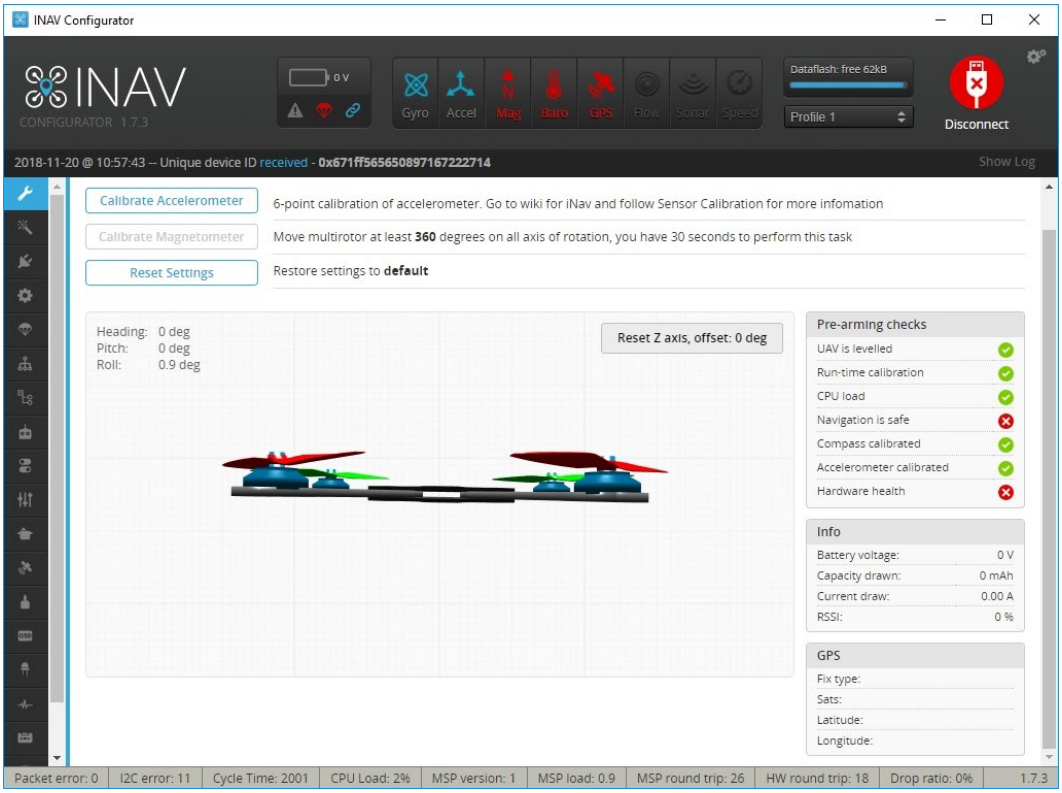


Рис. 5. Загрузка конфигуратором прошивки с cc3d. Показана настроенная прошивка

Для настройки прошивки выполняется последовательность действий в соответствии с рисунками.

1. Необходимо зайти во вкладки Ports и Configuration и обратить внимание на установку параметров, подчеркнутых красным. Контроллер cc3d должен быть полностью установлен на квадрокоптире с подключенными моторами и со снятыми пропеллерами. Батарея Lipo должна быть подключена, иначе напряжения питания на барометр, компас, приемник GPS поступать не будет (рис. 6)

Во вкладке Reciever, после включения приемника, выполняется перемещение всех стиков и тумблеров на пульте управления. Полоски на рисунке должны двигаться в соответствие со стиками [8].

2. Выполняется вход во вкладку Motors, включаются моторы, как представлено в [8] и перемещаются движки для каждого мотора. Они должны раскручиваться в соответствии с их номерами подключения к контроллеру как на верхнем левом рисунке. Направление вращения также должно соответствовать рисунку. В противном случае необходимо поменять местами два любых вывода двигателя.

3. На вкладке Setup выполняем калибровку Accelerometer. Для этого квадрокоптер устанавливается в разные положения как на рис. 7 и после каждого из них выполняется нажатие на кнопку Calibrate Accelerometer.

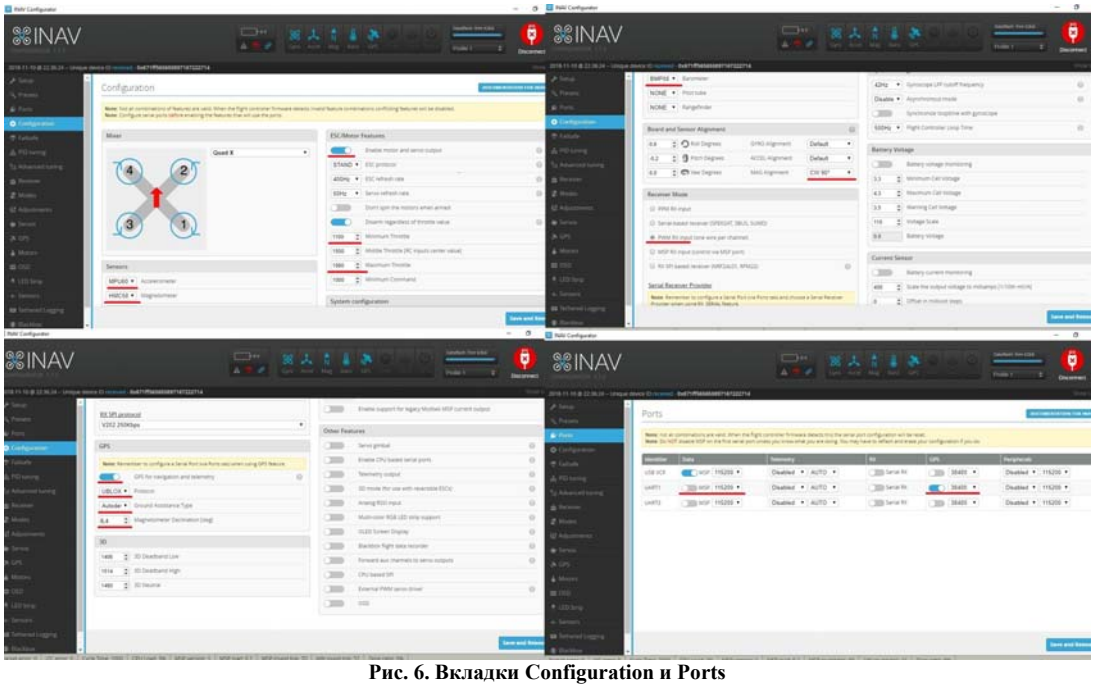


Рис. 6. Вкладки Configuration и Ports

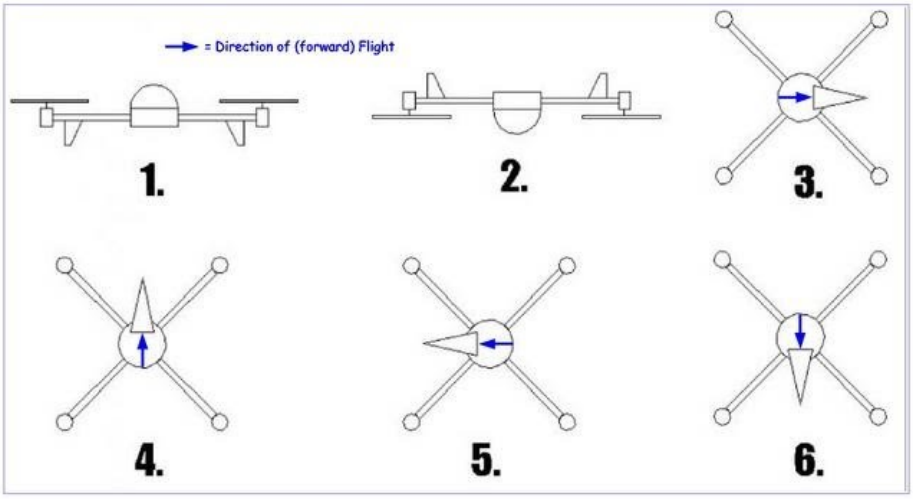


Рис. 7. Калибровка акселерометра

5. Выполняется вход во вкладку PID tuning и устанавливаются PID-ы в соответствии с рис. 8. А во вкладке Advanced tuning и устанавливаются параметры в соответствии источником [8].

6. Во вкладке Modes устанавливаются полетные режимы. Вначале необходимо установить режим полета ANGLE – на тумблере (AUX1). Это такой режим, что при максимальных отклонениях стиков квадрокоптер не перевернется. По умолчанию установлен режим ACRO, при котором квадрокоптер может отклоняться на любой угол вплоть до переворачивания. С режимом ANGLE совмещаем AIR MODE. Как уже отмечалось он позволяет при малых оборотах двигателей удерживать заданные значения PID регуляторов. В противном случае квадрокоптер, например, при резком спуске, будет раскачиваться вплоть до переворота. Далее на AUX1 устанавливаются режимы NAV ALTHOLD (удержание высоты) и NAV POSHOLD (удержание позиции). На тумблере AUX2 устанавливается режим NAV RTH (возврат домой).

7. Во вкладке Failsafe устанавливается режим возврата домой RTH в случае потери связи с пультом управления [8].

8. Калибровка компаса выполняется в поле перед запуском. Можно ее выполнить также и в лаборатории, но металлические предметы должны находиться на расстоянии. При калибровке должна быть выполнена определенная комбинация стиков. Левый стик вверх и вправо, правый вниз и удерживать эту комбинацию 1-2 сек. После этого в течении 30 сек. необходимо вращать коптер на 360 град по всем его осям.

9. При уводе коптера влево, вправо, вперед и назад при отсутствии ветра, выполняется программная калибровка с помощью пульта. Коптер устанавливается в горизонтальном положении на земле, верхний стик поднимается вверх, а правый перемещается до упора в сторону, противоположную смещению коптера. Например, если стики так держать в течении 4 сек, происходит изменение угла по Roll, Pitch примерно на 2 градуса.

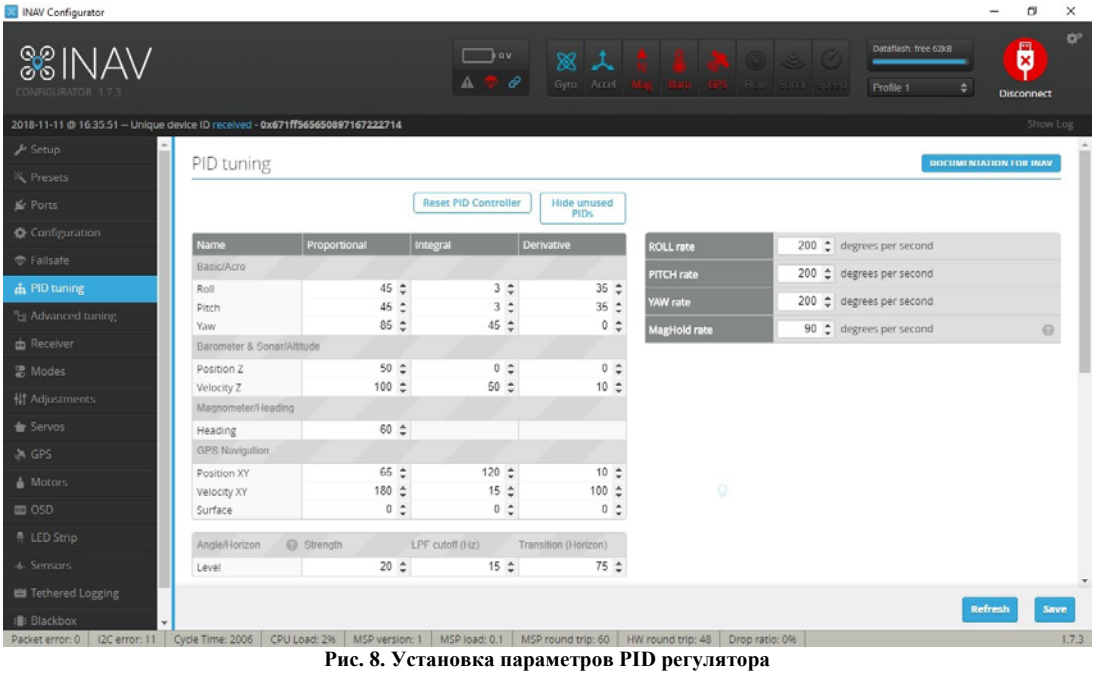


Рис. 8. Установка параметров PID регулятора

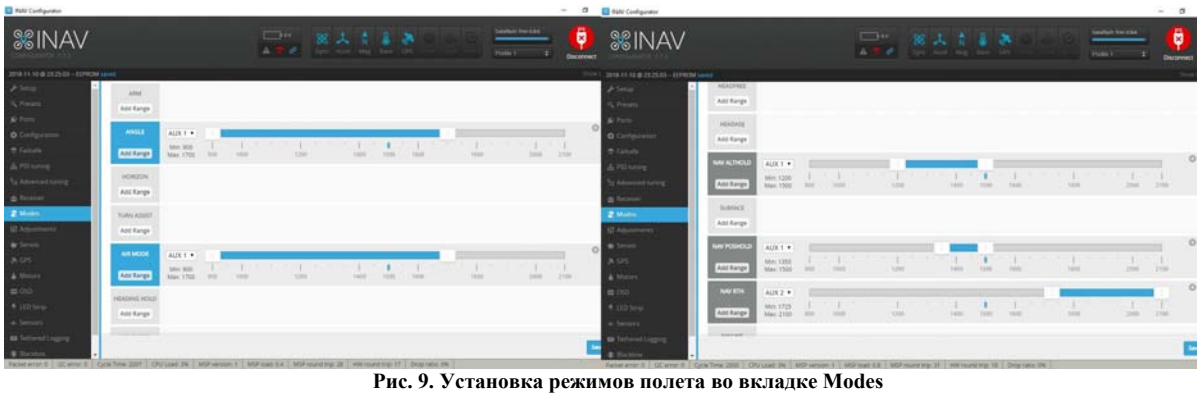


Рис. 9. Установка режимов полета во вкладке Modes

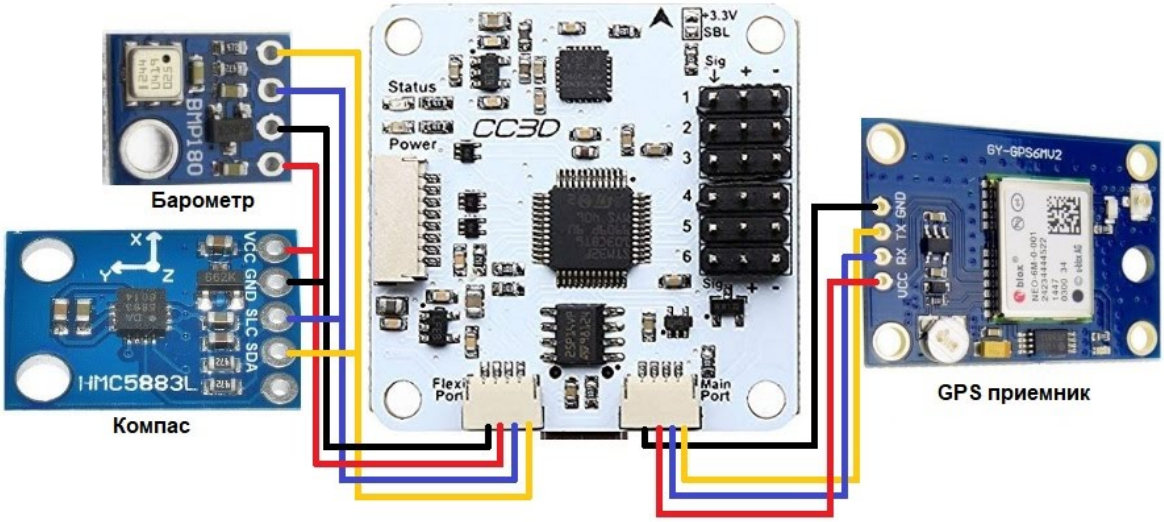


Рис. 10. Подключение к cc3d компаса, барометра, GPS приемника

Подключение к cc3d компаса, барометра, GPS приемника показано на рис. 10. Компас должен находиться над плоскостью вращения пропеллеров на высоте не менее 15 см.

Подключение приемника FS-IA6 системы управления к контроллеру cc3d показано на рис. 11

Калибровка регуляторов ESC, выполняется в вкладке Motors [8]. Для этого снимаются пропеллеры и отключается аккумулятор. Далее выполняется переход на вкладку Motors в конфигураторе и включаются моторы [8]. После перемещения слайдера Master наверх, на все двигатели будет подан полный газ. Теперь выполняется подключение аккумулятор – двигатели перейдут в режим калибровки. Далее передвигается слайдер Master полностью вниз, для установки уровня газа на ноль. Двигатели начнут пищать (проиграют

музыкальную мелодию), что означает завершение калибровки.

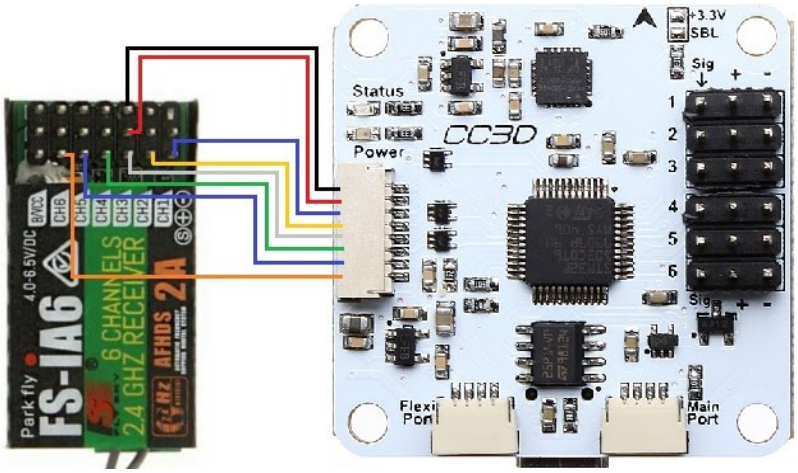


Рис. 11. Подключение приемника FS-IA6 системы управления к контроллеру cc3d

На рис. 12 представлено фото собранного квадрокоптера.

В прошивке INAV предусмотрен командный режим изменения параметров прошивки, которые не представлены во вкладках конфигуратора INAV. Так для изменения угла наклона коптера с 30 град. на 40 град. для ускорения полета при максимальном отклонении стиков по Roll, Pitch используются команды set max_angle_inclination_rll = 400, set max_angle_inclination_pit = 400. Для возврата домой "хвостом" (без разворота квадрокоптера) нужно выполнить команду set nav_rth_tail_first = ON. Для разрешения арминга без спутников используется команда set nav_extra_arming_safety = OFF. Для выполнения этих команд полетным контроллером квадрокоптера их необходимо сохранить командой save. Все эти команды вводятся во вкладке CLI [9].

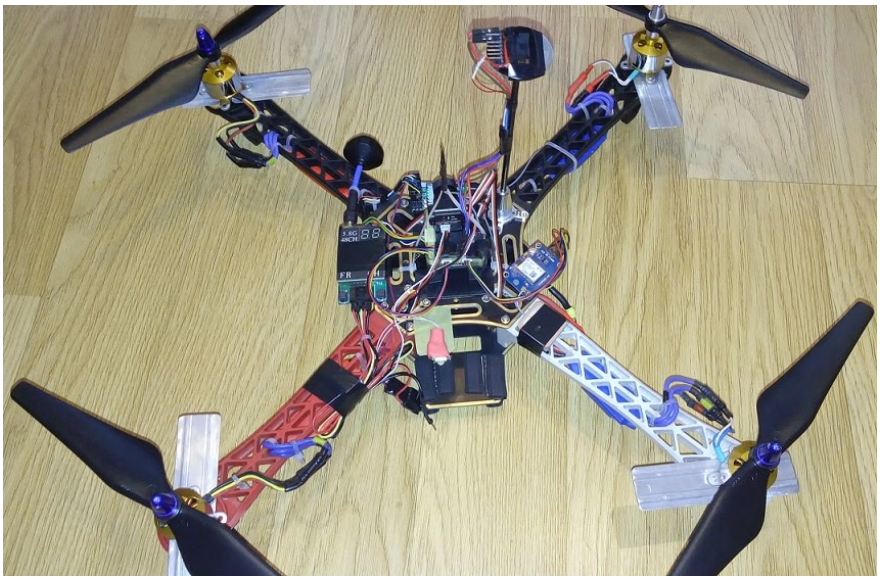


Рис. 12. Фото квадрокоптера на контроллере cc3d

Выводы

1. Построен квадрокоптер на полетном контроллере cc3d, перепрошитый с прошивки OpenPilot (LibrePilot) на прошивку INAV ver.1.7.2

2. С прошивкой INAV появилась возможность к полетному контроллеру cc3d подключить магнитометр, барометр и GPS приемник, вследствие чего появились навигационные функции, т.е. удержание высоты, позиции, возврат домой.

3. Показана возможность использования программы STM32 Flash loader demonstrator в качестве программатора для замены прошивки в cc3d с OpenPilot на INAV. Возможно ее использование для обратного возврата на прошивку OpenPilot (LibrePilot) при прошивке начального загрузчика OpenPilot (LibrePilot) с последующей прошивкой OpenPilot (LibrePilot) с помощью LibrePilot GCS [7].

4. При резком увеличении дроссельной заслонки(газа) коптер взмывает вверх, теряет устойчивость и заваливается на левую или правую сторону. Если не убавить газ и не регулировать стиками выравнивание по Roll, Pitch, коптер падает. При плавном увеличении дроссельной заслонки коптер сохраняет устойчивость при подъеме вверх. Только тщательный подбор моторов и пропеллеров позволил устойчиво подниматься вверх при резком увеличении газа. Таким образом PID-регуляторы прошивки INAV ver.1.7.2 на контроллере cc3d плохо работают с резкими отклонениями стиков, что приводит к аварии коптера. На прошивке OpenPilot (LibrePilot) с контроллером cc3d этого не наблюдается.

5. Для нулевого газа проблема плохой работы PID решена установкой режима AIR MODE. Без режима AIR MODE при резком сбросе дроссельной заслонки(газа) коптер теряет устойчивость и падает. На прошивке OpenPilot (LibrePilot) с контроллером cc3d этого не наблюдается.

Литература

1. Мясищев А.А. Построение БПЛА на базе полетного контроллера APM 2.6. / А.А. Мясищев // Вісник хмельницького національного університету. Технічні науки. – Хмельницький : ХНУ, 2016. – № 5. – С. 225–230.

2. CopterControl3D [Electronic resource]. – 2015. – Mode of access : http://multicopterwiki.ru/index.php/CopterControl3D.

3. The LibrePilot open source project [Electronic resource]. – 2017. – Mode of access : http://www.librepilot.org/site/index.html.

4. INAV [Electronic resource]. – 2018. – Mode of access : https://github.com/iNavFlight/inav/wiki.

5. Open-Source flight controller software for modern flight boards [Electronic resource]. – 2018. – Mode of access : http://cleanflight.com/.

6. F1, F3, F4 AND F7 FLIGHT CONTROLLER DIFFERENCES EXPLAINED [Electronic resource]. – 2017. – Mode of access : https://oscarliang.com/f1-f3-f4-flight-controller.

7. FLASHER-STM32 [Electronic resource]. – 2016. – Mode of access : https://www.st.com/en/development-tools/flasher-stm32.html.

8. Мясищев А.А. Квадрокоптер с прошивкой INAV ver. 1.7.2 на полетном контроллере cc3d evo с режимами удержания высоты, позиции, возврата домой [Electronic resource] / Мясищев А.А. – 2018. – Mode of access : https://sites.google.com/site/webstm32/inav-cc3d,

9. Command Line Interface (CLI) [Electronic resource]. – 2018. – Mode of access : https://github.com/iNavFlight/inav/blob/master/docs/Cli.md.

10. Мясищев А.А. Использование платы ROBOTDYN MEGA2560 PRO для построения полетного контроллера гексакоптера / А.А. Мясищев // Вісник хмельницького національного університету. Технічні науки. – Хмельницький : ХНУ, 2018. – № 3. – С. 171–179.

11. Мясищев А.А. Режими польоту контролерів польоту APM 2.6 I PIXHAWK БПЛА / А.А. Мясищев, В.В. Швец // Вісник хмельницького національного університету. Технічні науки. – Хмельницький : ХНУ, 2018. – № 1. – С. 78–82.

12. Мясищев А.А. Система навігації безпілотного наземного апарату на ARDUINO / А.А. Мясищев, А.П. Фарина // Вісник хмельницького національного університету. Технічні науки. – Хмельницький : ХНУ, 2018. – № 4. – С. 173–177.

13. U-center Windows. GNSS evaluation software for Windows [Electronic resource]. – 2018. – Mode of access : https://www.u-blox.com/en/product/u-center-windows.

14. Flashing the OpenPilot bootloader on a CC3D or Flashing Beta/Borisflight Hex on a CC3D [Electronic resource]. – 2015. – Mode of access : http://www.southquay3d.com/index.php?route=news/article&news_id=9.

References

1. Miasyshchev A.A. Postroenye BPLA na baze poletnoho kontrollera APM 2.6. / A.A. Miasyshchev // Herald of khmelnytskyi national university. Technical sciences. – Khmelnytskyi : KhNU, 2016. – № 5. – S. 225–230.

2. CopterControl3D [Electronic resource]. – 2015. – Mode of access : http://multicopterwiki.ru/index.php/CopterControl3D.

3. The LibrePilot open source project [Electronic resource]. – 2017. – Mode of access : http://www.librepilot.org/site/index.html.

4. INAV [Electronic resource]. – 2018. – Mode of access : https://github.com/iNavFlight/inav/wiki.

5. Open-Source flight controller software for modern flight boards [Electronic resource]. – 2018. – Mode of access : http://cleanflight.com/.

6. F1, F3, F4 AND F7 FLIGHT CONTROLLER DIFFERENCES EXPLAINED [Electronic resource]. – 2017. – Mode of access : https://oscarliang.com/f1-f3-f4-flight-controller.

7. FLASHER-STM32 [Electronic resource]. – 2016. – Mode of access : https://www.st.com/en/development-tools/flasher-stm32.html.

8. Miasyshchev A.A. Kvadrokopter s proshyvkoi INAV ver. 1.7.2 na poletnom kontrollere cc3d evo s rezhymamy uderzhanyia vysoty, pozytsii, vozvrata domoi [Electronic resource] / Miasyshchev A.A. – 2018. – Mode of access : https://sites.google.com/site/webstm32/inav-cc3d,

9. Command Line Interface (CLI) [Electronic resource]. – 2018. – Mode of access : https://github.com/iNavFlight/inav/blob/master/docs/Cli.md.

10. Miasyshchev A.A. Yspolzovanye platy ROBOTDYN MEGA2560 PRO dlia postroenyia poletnoho kontrollera heksakoptera / A.A. Miasyshchev // Herald of khmelnytskyi national university. Technical sciences. – Khmelnytskyi : KhNU, 2018. – № 3. – S. 171–179.

11. Miasyshchev A.A. Rezhymy polotu kontroleriv polotu APM 2.6 I PIXHAWK BPLA / A.A. Miasyshchev, V.V. Shvets // Herald of khmelnytskyi national university. Technical sciences. – Khmelnytskyi : KhNU, 2018. – № 1. – S. 78–82.

12. Miasyshchev A.A. Systema navihatsii bezpilotnoho nazemnoho aparatu na ARDUINO / A.A. Miasyshchev, A.P. Faryna // Herald of khmelnytskyi national university. Technical sciences. – Khmelnytskyi : KhNU, 2018. – № 4. – S. 173–177.

13. U-center Windows. GNSS evaluation software for Windows [Electronic resource]. – 2018. – Mode of access : https://www.u-blox.com/en/product/u-center-windows.

14. Flashing the OpenPilot bootloader on a CC3D or Flashing Beta/Borisflight Hex on a CC3D [Electronic resource]. – 2015. – Mode of access : http://www.southquay3d.com/index.php?route=news/article&news_id=9.

Рецензія/Peer review : 10.1.2019 р. Надрукована/Printed :16.2.2019 р.
Стаття рецензована редакційною колегією

DOI 10.31891/2307-5732-2019-269-1-137-144
УДК 004.89

І.Ю. ЧЕРЕПАНСЬКА, А.Ю. САЗОНОВ
Житомирський державний технологічний університет
О.М. БЕЗВЕСІЛЬНА
Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

ШТУЧНА НЕЙРОННА МЕРЕЖА ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО РОЗПІЗНАВАННЯ СКЛАДОВИХ ПОХИБОК ВИМІРЮВАННЯ

В статті представлена штучна нейронна мережа (ШНМ), яка дозволяє розпізнавати складові похибок вимірювання в режимі реального часу, при гоніометричних вимірюваннях величин плоского кута багатогранних призм. ШНМ є альтернативою традиційному методу дисперсійного аналізу за критерієм Фішера множини вимірювальних даних та дозволяє автоматизувати аналіз вимірювальної інформації при нормуванні похибок вимірювання. Це підвищує точність та швидкість, а також зменшує трудомісткість обробки вимірювальної інформації.

Ключові слова: *штучна нейронна мережа, дисперсійний аналіз, критерій Фішера, похибка вимірювання, випадкова складова похибки вимірювання, систематична складова похибки вимірювання.*

I. CHEREPANSKA, A. SAZONOV
Zhytomyr State Technological University
O. BEZVESILNA
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

ARTIFICIAL NEURAL NETWORK FOR AUTOMATED RECOGNITION OF CONSTRUCTION MEASUREMENTS

The purpose of the article is to develop an artificial neural network (ANN), which will allow the recognition of components of measurement errors in real time, with goniometric measurements of the flat angle of multifaceted prisms. An artificial neural network is developed for the automated recognition of components of measurement errors, which allows to perform high-performance (for an example in the article in 2 seconds) the definition of components of measurement errors in an automated mode. Time consumed by ANN for processing information is significantly less than the time spent using Fischer's dispersion analysis. This greatly reduces the complexity of the work performed, as well as improves the accuracy and speed of the processing of the measurement information. This is confirmed by the fact that for the whole test set of measurements of the magnitude of the flat angle of the 24-faceted prism, which was chosen as an example, the positive results of the work of the CNM were obtained. In this case, the probability of a correct response of ANN is close to 100%, and the average quadratic error of the ANN does not exceed 5%. The use of ANN can be an indisputable alternative to the traditional method of dispersion analysis according to Fisher's criterion, to automate the analysis of a plurality of measuring information in the normalization of measurement errors, to increase the accuracy and speed of processing of measurement information.

Keywords: *artificial neural network, dispersion analysis, Fisher's criterion, measurement error, random component of measurement error, systematic component of measurement error.*

Вступ

В ході обробки результатів багаторазових вимірювань величин плоского кута багатогранних призм, перед нормуванням похибок вимірювання, важливо визначити, яка саме складова похибки вимірювання – випадкова чи систематична – міститься у результатах вимірювання, адже в залежності від цього мають бути застосовані відповідні процедури їх нормування та компенсації, що суворо регламентуються відповідними нормативними документами.

Процедура визначення, яка саме складова похибки вимірювання (випадкова чи систематична) міститься у багаторазових результатах вимірювання, полягає у проведенні дисперсійного аналізу за критерієм Фішера, який дозволяє встановити факт наявності систематичної складової похибки вимірювання та проаналізувати джерела її виникнення. При цьому необхідно виконати низку трудомістких аналітичних обчислень. Це значно сповільнює процес обробки вимірювальної інформації. Тому необхідною є автоматизація процесу розпізнавання складових похибок вимірювання. Вказане може бути досягнуто за рахунок використання нейромережевих технологій обробки інформації та розробки штучної нейронної мережі (ШНМ). Переваги застосування ШНМ для вирішення поставленої задачі є незаперечними зважаючи на простоту, швидкість і автоматизацію прийняття рішення.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Аналіз відомих інформаційних джерел [1, 2], показав, що класичними методами визначення складових похибок вимірювання є дисперсійний аналіз за критерієм Фішера та критерієм Вілкоксона. При цьому найбільш ефективним вважається застосування дисперсійного критерію Фішера. У роботах [1, 2] вказується, що визначення складових похибок вимірювання із застосуванням цих методів є багатоетапним [1] і рутинним [2] та, відповідно, досить трудомістким процесом, що вимагає значних витрат часу.

Альтернативою вказаним методам, що дозволяє автоматизувати визначення складових похибок вимірювання та підвищити продуктивність виконуваних робіт можуть бути ШНМ. Відомо, що ШНМ успішно використовуються для розв'язання різноманітних задач обробки та аналізу даних в умовах неповноти, суперечливості та динамічності вхідної інформації на основі методів її паралельної обробки. Зокрема відома низка робіт [3–5], в яких ШНМ застосовуються для автоматизації визначення похибок. Так в роботі [3] ШНМ використовується для прогнозування поведінки похибки одометрів мобільного робота в

часі, проте систематична та випадкова складові похибки не визначаються. В роботі [4] ШНМ використовуються для автоматизованого виявлення систематичної похибки при калібруванні кутомірних геодезичних приладів. Показано, що застосування нейромережевих алгоритмів дозволяє скоротити час та спростити цю процедуру. Проте задача попереднього визначення складових похибки вимірювання кутомірними геодезичними приладами не вирішується. В роботі [5] приводиться модель нейромережевого вимірювального перетворювача для кутових вимірювань. Аналіз та компенсація похибки відбувається на рівні елементів та підсистем перетворювача. ШНМ застосовується для виділення впливу окремих елементів системи на величину систематичної похибки в цілому. Виявлення випадкової складової похибки не проводиться.

Таким чином, проблема автоматизованого визначення складових похибок вимірювання, в тому числі в режимі реального часу, є ще й досі невирішеною. Тому необхідність даної роботи обумовлюється відсутністю розробок, які б дозволили проводити автоматизоване розпізнавання складових похибок вимірювання у множині вимірювальної інформації для зменшення трудомісткості виконуваних робіт та підвищення їх швидкості.

Мета статті. Розробити штучну нейронну мережу (ШНМ), яка дозволить розпізнавати складові похибок вимірювання в режимі реального часу, зокрема при гоніометричних вимірюваннях величин плоского кута багатогранних призм, а також інших об'єктів виробництва машино- та приладобудування.

Основний матеріал статті

В загальному випадку задача розпізнавання складових похибок вимірювання може бути представлена наступним чином.

Ґрунтуючись на даних багаторазових вимірювань величин плоских кутів типових багатогранних призм, які використовуються для регулювання і настройки кутомірних приладів і безпосереднього вимірювання кутів промислових виробів відповідно до ГОСТ 2875-88, наприклад, ППБ-6, ППБ-8, ППБ-10, ППБ-12, ППБ-18, ППБ-24 (табл. 1), необхідно визначити, які саме складові похибок вимірювання (випадкові чи систематичні) містяться в отриманих результатах. Дана задача в термінології нейромережевих технологій належить до задач класифікації, для розв'язання яких використовуються багатошарові ШНМ прямого поширення.

Особливість процедури багаторазових вимірювань полягає в тому, що отримані результати відрізняться один від одного через наявність похибок. Відомо, що джерелами виникнення похибок при всіх вимірюваннях є методичні, інструментальні та суб'єктивні похибки, які проявляються в результатах вимірювання у вигляді систематичних та випадкових складових [1], зміна яких у часі являє собою нестаціонарний випадковий процес [1, 2]. На рис. 1 графічно представлено приклад розподілення результатів вимірювання, як випадкових величин, при багаторазових вимірюваннях плоского кута 24-граної призми ППБ-24.

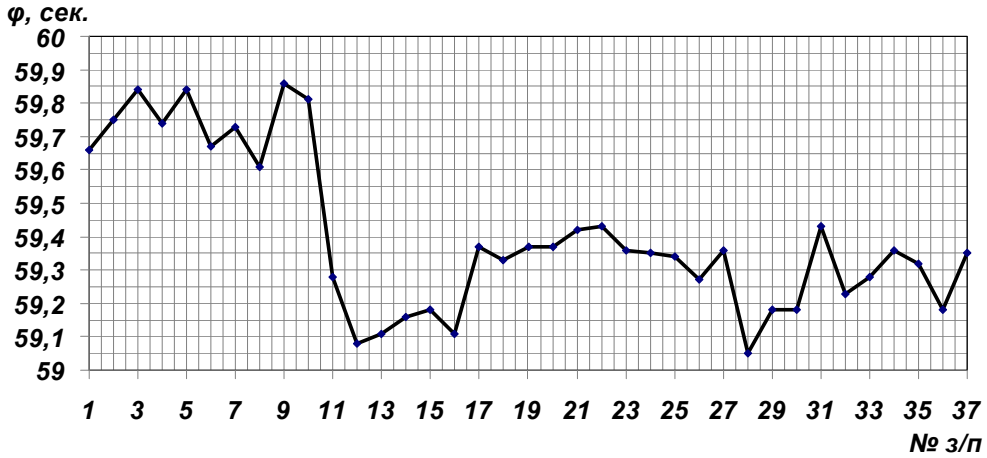


Рис. 1. Графічне представлення розподілення випадкових величин при багаторазових (N = 37) вимірюваннях плоского кута 24-граної призми

Визначення, яка саме складова похибки вимірювання (випадкова чи систематична) міститься в отриманих результатах, здійснюють традиційно шляхом дисперсійного аналізу за критерієм Фішера [1]. Проте, ця процедура вимагає проведення значної кількості довготривалих математичних обчислень, що в результаті значно підвищує трудомісткість вирішуваної задачі. Так, наприклад, застосування дисперсійного аналізу за критерієм Фішера для множини результатів вимірювання величини кута 24-гранної призми, вимагає виконання 223 математичних операції, зокрема 114 операцій додавання, 46 – віднімання, 46 – множення та 17 – ділення (рис. 2, табл. 1). При цьому, враховуючи, що, як правило, при вимірюваннях проводять багаторазові спостереження, кількість N результатів яких може бути досить великою, необхідність автоматизації цього процесу є очевидною.

Зважаючи на успіхи використання ШНМ для автоматизованого розв'язання різноманітних задач обробки та аналізу даних в умовах неповноти, суперечливості та динамічності вхідної інформації, а також

можливості її паралельної обробки, швидкого навчання та перенавчання при зміні умов вирішуваних задач, високу ймовірність правильних та достовірних відповідей, вказує на незаперечність їх (ШНМ) застосування для автоматизованого розпізнавання (ідентифікації) складових похибок вимірювання на етапі аналізу вимірюваної інформації.

Таблиця 1

Результати дисперсійного аналізу за критерієм Фішера множини результатів вимірювання величини кута 24-гранної призми

№ з/п	Виміряні значення кута, φ_k			№ з/п	Виміряні значення кута, φ_k		
	град.	хв.	сек.		град.	хв.	сек.
1	164	59	59,66	20	164	59	59,37
2	164	59	59,75	21	164	59	59,42
3	164	59	59,84	22	164	59	59,43
4	164	59	59,74	23	164	59	59,36
5	164	59	59,84	24	164	59	59,35
6	164	59	59,67	25	164	59	59,34
7	164	59	59,73	26	164	59	59,27
8	164	59	59,61	27	164	59	59,36
9	164	59	59,86	28	164	59	59,05
10	164	59	59,81	29	164	59	59,18
11	164	59	59,28	30	164	59	59,18
12	164	59	59,08	31	164	59	59,43
13	164	59	59,11	32	164	59	59,23
14	164	59	59,16	33	164	59	59,28
15	164	59	59,18	34	164	59	59,36
16	164	59	59,11	35	164	59	59,32
17	164	59	59,37	36	164	59	59,18
18	164	59	59,33	37	164	59	59,35
19	164	59	59,37				

Значення критерію Фішера		
розрахункове F		2,39
табличне F_q	$F_{0,01}\|P$=0,99	4,41
	$F_{0,05}\|P$=0,95	2,88
Висновок: У результатах вимірювання наявна випадкова складова похибки вимірювання		

Методика формування навчальної множини бази даних для навчання ШНМ автоматизованого розпізнавання складових похибок вимірювання

Для навчання ШНМ, відповідно до вимог нейромережевих технологій, синтезовано відповідну навчальну базу даних (БД), що містить множину навчальних прикладів $\langle X, Y \rangle$, де $X = (X_1, X_2, \ldots, X_S)$ – вектор вхідних даних (сигналів) ШНМ; $Y = (Y_1, Y_2, \ldots, Y_N)$ – вектор вихідних даних (сигналів) ШНМ.

Вхідними даними для навчання ШНМ автоматизованого розпізнавання складових похибок вимірювання, є множини результатів вимірювання величин плоских кутів типових багатогранних призм, які використовуються для регулювання і настройки кутомірних приладів і безпосереднього вимірювання кутів промислових виробів відповідно до ГОСТ 2875-88, наприклад, ППБ-6, ППБ-8, ППБ-10, ППБ-12, ППБ-18, ППБ-24. Множини результатів вимірювання були отримані двома шляхами. Шляхом апаратного вимірювання величини плоского кута окремих багатогранних призм, зокрема 24-гранної призми ППБ-24, за допомогою прецизійної приладової системи вимірювання кутів [6]. Та шляхом імітаційного моделювання на ЕОМ, що обумовлюється неможливістю практичного отримання всієї множини комбінацій результатів експериментального апаратурного вимірювання величин плоских кутів багатогранних призм.

Вихідні данні для навчання ШНМ автоматизованого розпізнавання складових похибок вимірювання, що занесені у навчальну базу даних являють собою результати ідентифікації (розпізнавання) складових похибок вимірювання, що містяться у множинах результатів вимірювання величин плоских кутів багатогранних призм ППБ-6, ППБ-8, ППБ-10, ППБ-12, ППБ-18, ППБ-24, визначені за результатами дисперсійного аналізу за критерієм Фішера. Фрагмент навчальної множини, зокрема вектору вхідних та вихідних сигналів бази даних для навчання ШНМ автоматизованого розпізнавання складових похибок вимірювання приведено в табл. 2, табл. 3.

Вказане дозволило створити базу даних прикладів для навчання ШНМ автоматизованого розпізнавання складових похибок вимірювання, яка охоплює множину варіантів розподілення випадкових величин при багаторазових вимірюваннях плоских кутів типових багатогранних призм, які використовуються для регулювання і настройки кутомірних приладів і безпосереднього вимірювання кутів промислових виробів відповідно до ГОСТ 2875-88, наприклад, ППБ-6, ППБ-8, ППБ-10, ППБ-12, ППБ-18, ППБ-24.

Кожний приклад навчальної множини $\langle X, Y \rangle$ бази даних для навчання ШНМ автоматизованого розпізнавання складових похибок вимірювання, відповідно до вимог нейромережевих технологій, являє собою пару векторів X та Y. Кожному вхідному вектору $X = (X_1, X_2, \ldots, X_S)$, що описується виразом (1) відповідає вектор бажаних вихідних сигналів $Y = (Y_1, Y_2, \ldots, Y_N)$, що описується виразом (2).

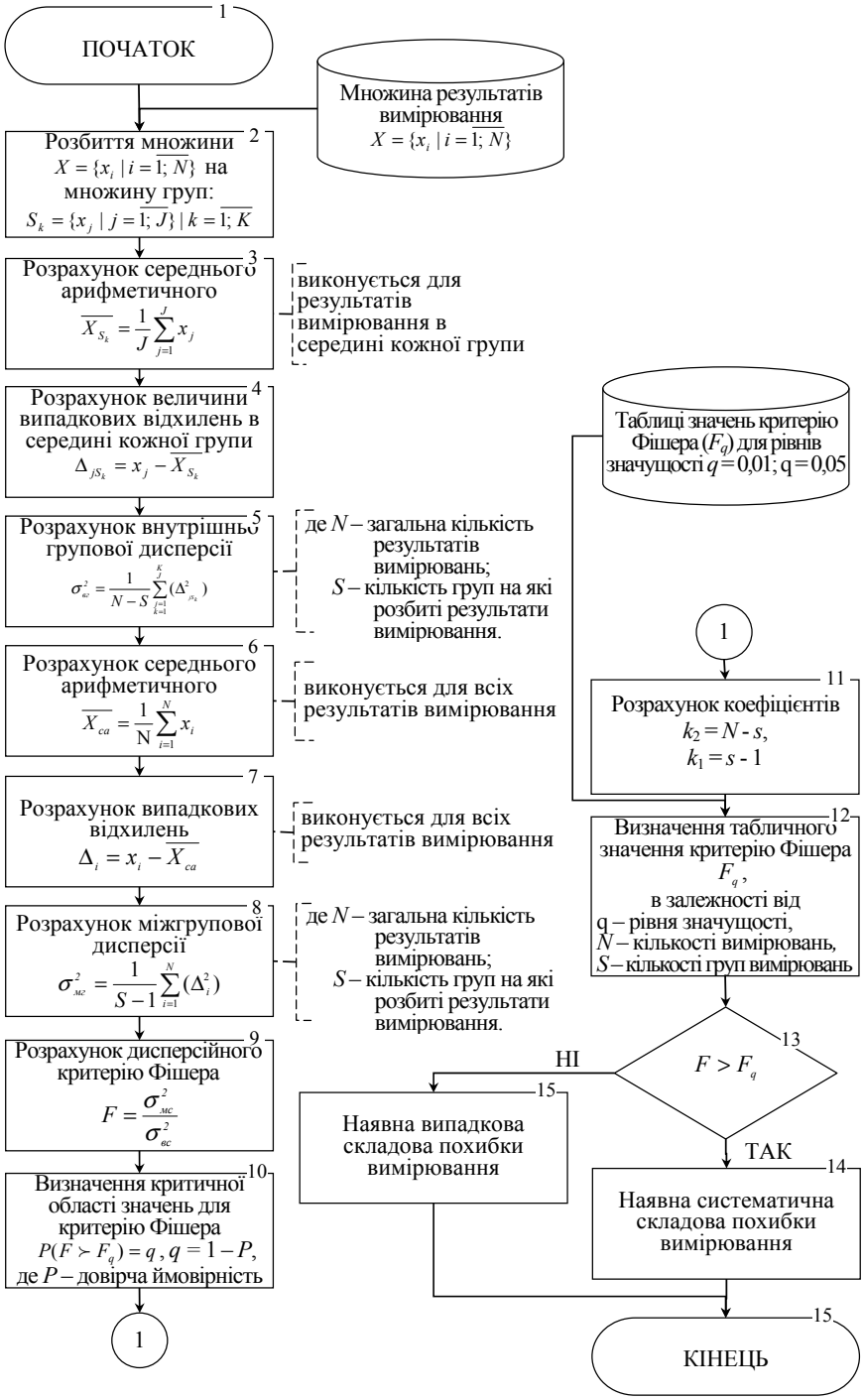


Рис. 2. Узагальнена блок-схема алгоритму дисперсійного аналізу за критерієм Фішера множини результатів вимірювання при визначенні складових похибок вимірювання

$$X = \{x_k \mid k = \overline{1; N}\}, \tag{1}$$

де X – вектор вхідних сигналів ШНМ;

x_k – вхідний сигнал ШНМ, що відповідає k-му результату спостереження при багаторазових вимірюваннях;

N – кількість вимірюваних даних, що попередньо визначається як необхідна і достатня кількість вимірювань за відомою методикою [7].

$$Y = \{y_m \mid m = \overline{1; 2}\} = \{y_1; y_2\}, \tag{2}$$

де Y – вектор вихідних сигналів ШНМ;

m – кількість складових похибок вимірювання, що аналізуються;

y_1 – вихідний сигнал ШНМ, що відповідає наявності систематичної складової похибки вимірювання у результатах спостереження при багаторазових вимірюваннях;

y_2 – вихідний сигнал ШНМ, що відповідає наявності випадкової складової похибки вимірювання у результатах спостереження при багаторазових вимірюваннях.

Таблиця 2

Фрагмент навчальної множини бази даних для навчання ШНМ автоматизованого розпізнавання складових похибок вимірювання: вектор вхідних сигналів ШНМ, що є множиною результатів багаторазових вимірювань плоского кута 24-гранної призми

Кодове позначення прикладу у БД	Векторний алфавіт вхідного вектору $X = \{x_k \mid k = \overline{1; 40}\}$ виміряних значень кута, φ_k, сек.									
	від x_1 до x_{10}									
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}
ППБ-24.1	59,66	59,75	59,84	59,74	59,84	59,67	59,73	59,61	59,86	59,81
ППБ-24.2	60,0003	60,0006	60,0009	60,0012	60,0015	60,0018	60,0021	60,0024	60,0027	60,003
ППБ-24.3	59,18	59,19	59,05	59,08	59,04	59,14	58,77	58,66	58,96	59,17
ППБ-24.4	59,0003	59,0006	59,0009	59,0012	59,0015	59,0018	59,0021	59,0024	59,0027	59,003
ППБ-24.5	59,09	59	58,7	58,7	58,94	58,65	58,89	59,17	59,35	58,89
ППБ-24.6	59,1	58,94	58,99	58,86	58,94	58,91	59,28	59,35	58,8	59,24
ППБ-24.7	59,17	59,26	59,17	58,6	58,87	59,16	58,73	59,04	58,96	59,04
ППБ-24.8	58,91	59,21	58,98	59,16	58,85	58,98	59,1	59	58,84	58,77
ППБ-24.9	58,5003	58,5006	58,5009	58,5012	58,5015	58,5018	58,5021	58,5024	58,5027	58,503
ППБ-24.10	57,7003	57,7006	57,7009	57,7012	57,7015	57,7018	57,7021	57,7024	57,7027	57,703
	від x_{11} до x_{20}									
	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}	x_{15}	x_{16}	x_{17}	x_{18}	x_{19}	x_{20}
ППБ-24.1	59,28	59,08	59,11	59,16	59,18	59,11	59,37	59,33	59,37	59,37
ППБ-24.2	60,0033	60,0036	60,0039	60,0042	60,0045	60,0048	60,0051	60,0054	60,0057	60,006
ППБ-24.3	59,08	59,19	58,66	59,04	58,65	58,88	58,96	58,63	58,95	59,38
ППБ-24.4	59,0033	59,0036	59,0039	59,0042	59,0045	59,0048	59,0051	59,0054	59,0057	59,006
ППБ-24.5	58,76	58,75	58,85	59,05	59,05	58,66	59,01	59,15	58,92	58,86
ППБ-24.6	58,96	59,24	59,18	58,93	59,41	58,42	59,04	58,96	58,63	59,12
ППБ-24.7	59,15	59,23	58,76	59,07	58,69	58,83	59,3	58,81	59,3	59,05
ППБ-24.8	58,71	59,2	58,72	59,32	58,85	58,87	58,89	59,09	58,98	59,19
ППБ-24.9	58,5033	58,5036	58,5039	58,5042	58,5045	58,5048	58,5051	58,5054	58,5057	58,506
ППБ-24.10	57,7033	57,7036	57,7039	57,7042	57,7045	57,7048	57,7051	57,7054	57,7057	57,706
	від x_{21} до x_{30}									
	x_{21}	x_{22}	x_{23}	x_{24}	x_{25}	x_{26}	x_{27}	x_{28}	x_{29}	x_{30}
ППБ-24.1	59,42	59,43	59,36	59,35	59,34	59,27	59,36	59,05	59,18	59,18
ППБ-24.2	60,0063	60,0066	60,0069	60,0072	60,0075	60,0078	60,0081	60,0084	60,0087	60,009
ППБ-24.3	59,18	58,93	58,8	59,14	59,15	58,71	59,43	59,14	58,78	59,29
ППБ-24.4	59,0063	59,0066	59,0069	59,0072	59,0075	59,0078	59,0081	59,0084	59,0087	59,009
ППБ-24.5	59,11	58,84	59,01	59,21	58,84	59,21	59,16	59,03	59,38	58,75
ППБ-24.6	58,71	58,82	58,95	59,2	58,91	58,79	58,91	59,03	59,14	58,85
ППБ-24.7	58,86	58,74	58,8	59,29	58,84	58,8	58,89	59,16	59,15	59,21
ППБ-24.8	59,36	59,11	59,11	58,88	59,23	58,76	59,04	58,58	58,97	59,07
ППБ-24.9	58,5063	58,5066	58,5069	58,5072	58,5075	58,5078	58,5081	58,5084	58,5087	58,509
ППБ-24.10	57,7063	57,7066	57,7069	57,7072	57,7075	57,7078	57,7081	57,7084	57,7087	57,709
	від x_{31} до x_{40}									
	x_{31}	x_{32}	x_{33}	x_{34}	x_{35}	x_{36}	x_{37}	x_{38}	x_{39}	x_{40}
ППБ-24.1	59,43	59,23	59,28	59,36	59,32	59,18	59,35	59,03	58,91	59,12
ППБ-24.2	60,0093	60,0096	60,0099	60,0102	60,0105	60,0108	60,0111	60,0114	60,0117	60,012
ППБ-24.3	59,2	58,95	58,45	59,4	59,46	58,94	59,13	59,02	59,32	59,08
ППБ-24.4	59,0093	59,0096	59,0099	59,0102	59,0105	59,0108	59,0111	59,0114	59,0117	59,012
ППБ-24.5	58,92	59,03	58,97	59,37	59,28	59,05	59,07	59,32	59,16	59,33
ППБ-24.6	58,97	59,01	58,86	59,13	59,16	59,12	58,57	58,96	59,19	59,06
ППБ-24.7	59,08	59,04	59,08	58,99	58,93	59	58,93	58,77	58,9	59
ППБ-24.8	58,9	58,72	59,15	59,06	59,21	58,81	59,05	58,74	59,14	59,08
ППБ-24.9	58,5093	58,5096	58,5099	58,5102	58,5105	58,5108	58,5111	58,5114	58,5117	58,512
ППБ-24.10	57,7093	57,7096	57,7099	57,7102	57,7105	57,7108	57,7111	57,7114	57,7117	57,712

Таблиця 3

Фрагмент Вихідний вектор навчальної множини за результатами вимірювання плоских кутів робочими та еталонними засобами для регулювання і настройки кутомірних приладів і безпосереднього вимірювання кутів промислових виробів ГОСТ 2875-88

Кодове позначення прикладу у БД	Значення критерію Фішера			Примітка	Вихідний вектор	
	Розрахункове F	табличне F_q				
		$F_{0,01}$ | $P = 0,99$	$F_{0,05}$ | $P = 0,95$		y_1	y_2
ППБ-24 /1	4,03	4,41	2,28	Ймовірність наявності випадкової похибки становить 99%, систематичної – 95%	1	0
ППБ-24 /2	18,1818	4,41	2,28	Наявна систематична похибка	1	0
ППБ-24 /3	0,0719	4,41	2,28	Наявна випадкова похибка	0	1
ППБ-24 /4	18,1818	4,41	2,28	Наявна систематична похибка	1	0
ППБ-24 /5	0,3536	4,41	2,28	Наявна випадкова похибка	0	1
ППБ-24 /6	0,0469	4,41	2,28	Наявна випадкова похибка	0	1
ППБ-24 /7	0,0136	4,41	2,28	Наявна випадкова похибка	0	1
ППБ-24 /8	0,0056	4,41	2,28	Наявна випадкова похибка	0	1
ППБ-24 /9	18,1818	4,41	2,28	Наявна систематична похибка	1	0
ППБ-24 /10	0,1029	4,41	2,28	Наявна систематична похибка	1	0

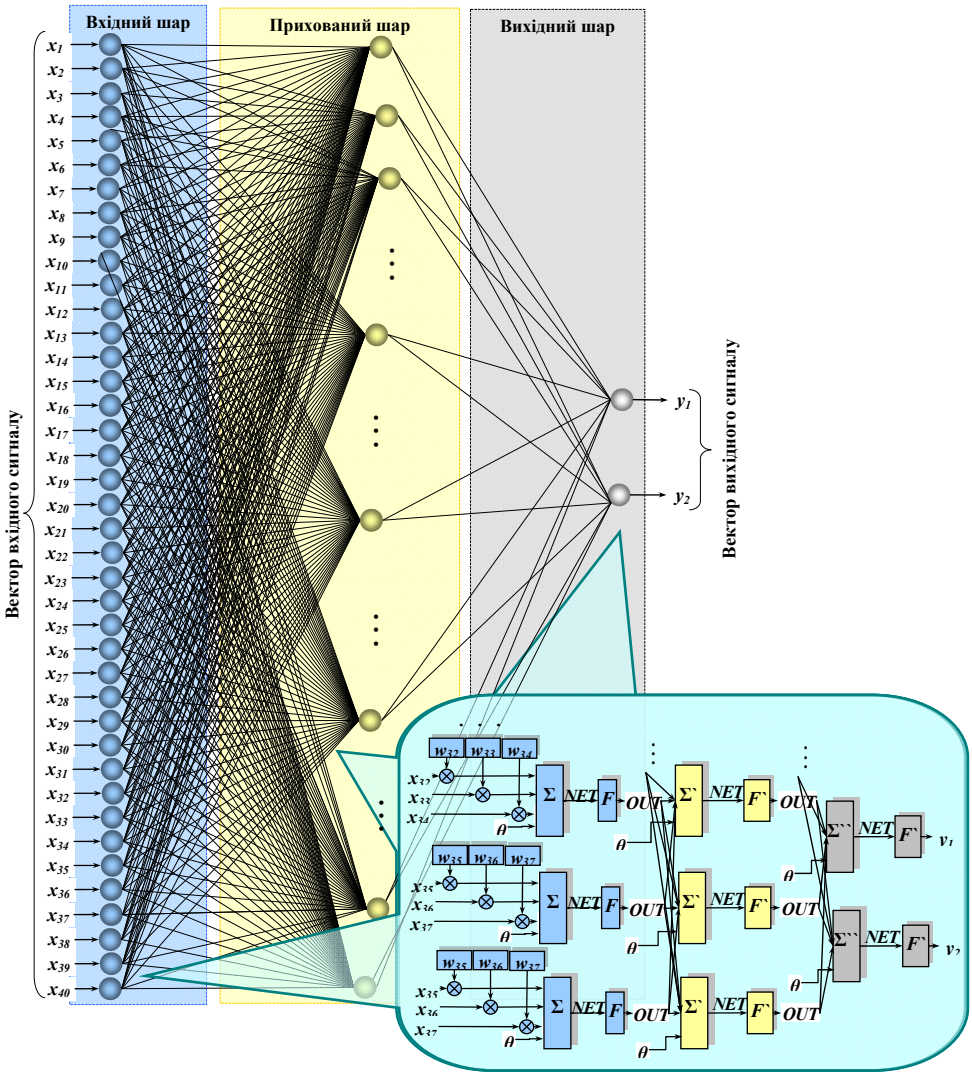


Рис. 3. Спрощена структурна схема ШНМ автоматизованого розпізнавання складових похибок вимірювання

Синтез архітектури ШНМ автоматизованого розпізнавання складових похибок вимірювання

Побудова та навчання ШНМ автоматизованого розпізнавання складових похибок вимірювання здійснювалась з використанням нейроімітатора Neural Analyzer аналітичного пакету Deductor Professional (Lite-версії) [8] та табличного процесора Excel. Шляхом послідовної зміни кількості L нейронів прихованого

шару в діапазоні [1], що обчислювався за відомими виразами (3) та (4), була визначена наступна архітектура ШНМ: багатошарова мережа прямого поширення з розмірністю вхідного шару 40 нейронів, прихованого – 60 нейронів, вихідного – 2 нейрони, функція активації нейронів – сигмоїда (або функція Фермі).

$$L = \frac{L_w}{n+m}, \tag{3}$$

де L – кількість нейронів прихованого шару;
L_w – кількість синаптичних ваг нейронів;
n – розмірність вхідного шару ШНМ;
m – розмірність вихідного шару ШНМ.

$$\frac{m \cdot N}{1+\log_2 N} \le L_w \le m \cdot \left(\frac{N}{m}+1\right) \cdot (n+m+1) + m, \tag{4}$$

де N – кількість прикладів навчальної множини БД.

Спрощена структура пропонованої ШНМ наведена на рис. 3.

Навчання ШНМ автоматизованого розпізнавання складових похибок вимірювання проводилось методом “навчання з вчителем” за відомим алгоритмом back propagation.

В табл. 4 наведені результати роботи ШНМ для тестових результатів багаторазового вимірювання величини плоского кута 24-гранної призми.

Таблиця 4

Результати роботи ШНМ автоматизованого розпізнавання складових похибок вимірювання при багаторазових вимірюваннях величини плоского кута 24-гранної призми

Позначення прикладу навчальної множини	Бажані значення виходів Y^*		Фактичні значення виходів Y		Середня квадратична похибка E, %	Примітка
	y^*_1	y^*_2	y_1	y_2		
Параметри ШНМ: вхідних нейронів 40; вихідних нейронів 2; прихованих шарів 1; кількість нейронів прихованого шару 60. **Тривалість навчання:** 9502 ітерацій / 10 хв. **Тривалість розпізнавання складових похибок вимірювання:** 2 с.						
ППБ-24 /1	**1**	0	0,998	0,002	0,0%	Відповідь ШНМ вірна
ППБ-24 /2	**1**	0	0,812	0,188	3,5%	Відповідь ШНМ вірна
ППБ-24 /3	0	**1**	0,023	0,977	0,1%	Відповідь ШНМ вірна
ППБ-24 /4	**1**	0	1,000	0,000	0,0%	Відповідь ШНМ вірна
ППБ-24 /5	0	**1**	0,022	0,978	0,1%	Відповідь ШНМ вірна
ППБ-24 /6	0	**1**	0,000	1,000	0,0%	Відповідь ШНМ вірна
ППБ-24 /7	0	**1**	0,002	0,998	0,0%	Відповідь ШНМ вірна
ППБ-24 /8	0	**1**	0,002	0,998	0,0%	Відповідь ШНМ вірна
ППБ-24 /9	**1**	0	1,000	0,000	0,0%	Відповідь ШНМ вірна
ППБ-24 /10	**1**	0	0,990	0,010	0,0%	Відповідь ШНМ вірна
y_1 – вихідний сигнал ШНМ, що відповідає наявності систематичної складової похибки вимірювання; y_2 – вихідний сигнал ШНМ, що відповідає наявності випадкової складової похибки вимірювання.						

Інтерпретація результатів роботи ШНМ автоматизованого розпізнавання складових похибок вимірювання

Аналізуючи наведене в табл. 4, можна стверджувати про відмінну роботу ШНМ, на що вказує наступне:

1. Для всієї тестової множини результатів вимірювання величини плоского кута 24-гранної призми ППБ-24, що була обрана в якості прикладу, отримані позитивні результати роботи ШНМ.
2. Ймовірність правильної відповіді ШНМ є близькою до 100%.
3. Середня квадратична похибка роботи ШНМ не перевищує 5%.

При цьому варто зазначити, що процес навчання ШНМ є досить трудомістким, а якість навчання та подальшої роботи ШНМ залежить від якості та кількості прикладів в навчальній БД, а також кваліфікації працівників, адже підготовка даних навчальної множини вимагає спеціальних знань щодо нейромережевих технологій, технічних характеристик об’єктів вимірювання та апріорної інформації про умови проведення експериментів.

Висновки

Розроблено ШНМ автоматизованого розпізнавання складових похибок вимірювання, яка дозволяє здійснювати високопродуктивне (для розглядуваного в статті прикладу за 2 с) визначення складових похибок вимірювання в автоматизованому режимі. Час, що може бути витрачений ШНМ на обробку інформації, очевидно, є значно меншим порівняно із часом, що витрачається під час застосування дисперсійного аналізу за критерієм Фішера. Це значно зменшує трудомісткість виконуваних робіт, а також

підвищує точність та швидкість обробки вимірювальної інформації.

Застосування ШНМ при розпізнаванні складових похибок вимірювання може бути безперечною альтернативою традиційному методу дисперсійного аналізу за критерієм Фішера та дозволяє автоматизувати аналіз множини вимірювальної інформації при нормуванні похибок вимірювання, що безперечно підвищує точність та швидкість обробки вимірювальної інформації.

Література

1. Метрология интеллектуальных измерительных систем : монография / [Шевчук В. П., Капля В. И., Желтоногов А. П., Лясин Д. Н. Волгоград]. – 2005. – 210 с.

2. Farrance I. Uncertainty of Measurement: A Review of the Rules for Calculating Uncertainty Components through Functional Relationships / I. Farrance, R. Frenkel // Clin. Biochem. Rev. – 2012. – Vol. 33, Issue 2. – P. 49–75.

3. Касьяник В. В. Применение нейросетевого подхода для оценки погрешности одометров мобильного робота [Електронний ресурс] / Касьяник В. В., Дунец А. П., Дунец И. П., Шуть В. Н. – Режим доступу : http://robotics.bstu.by/mwiki/images/8/8d/Neuroinformatika_2012.pdf

4. Голыгин Н. Х. Возможности повышения точности геодезических измерений на основе искусственных нейросетей / Н. Х. Голыгин, О. Б. Хиноева, Х. К. Ямбаев // Изв. ВУЗов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2005. – № 5. – С. 17–27.

5. Скворцов М. Г. Нейросетевой измерительный преобразователь / М. Г. Скворцов, Е. А. Зрюмов, С. П. Пронин // Известия ВолгГТУ. – 2011. – Т. 6, № 5. – С. 88–90.

6. Cherepanska I. Automated Technological Complex to Precise Angles Measurement Based on Goniometer / I. Cherepanska, E. Bezvesilna, A. Sazonov, A. Lavrischev // Technological Complexes. – 2015. – № 1/2 (12). – P. 38–45.

7. Cherepanska I. The procedure for determining the number of measurements in the normalization of random error of an information-measuring system with elements of artificial intelligence / Irina Cherepanska, Elena Bezvesilna, Artem Sazonov, Sergey Nechai, Tatiana Khylchenko // Eastern-European journal of enterprise technologies. – 2017. – № 5/9 (89). – P. 58–67.

8. Аналитический пакет Deductor Professional : [руководство пользователя]. – BaseGroupLabs, 2002. – 184 с.

References

1. Metrologija intellektual'nyh izmeritel'nyh sistem : monografija / [Shevchuk V. P., Kaplja V. I., Zheltonogov A. P., Ljasin D. N. Volgograd]. – 2005. – 210 s.

2. Farrance I. Uncertainty of Measurement: A Review of the Rules for Calculating Uncertainty Components through Functional Relationships / I. Farrance, R. Frenkel // Clin. Biochem. Rev. – 2012. – Vol. 33, Issue 2. – P. 49–75.

3. Kas'janik V. V. Primenenie nejrosetevogo podhoda dlja ocenki pogreshnosti odometrov mobil'nogo robota [Elektronnij resurs] / Kas'janik V. V., Dunec A. P., Dunec I. P., Shut' V. N. – Rezhim dostupu : http://robotics.bstu.by/mwiki/images/8/8d/Neuroinformatika_2012.pdf

4. Golygin N. H. Vozmozhnosti povyshenija tochnosti geodezicheskih izmerenij na osnove iskusstvennyh nejrosetej / N. H. Golygin, O. B. Hinoeva, H. K. Jambaev // Izv. VUZov. Geodezija i ajerofotos#emka. – 2005. – № 5. – S. 17–27.

5. Skvorcov M. G. Nejrosetevoj izmeritel'nyj preobrazovatel' / M. G. Skvorcov, E. A. Zrjumov, S. P. Pronin // Izvestija VolgGTU. – 2011. – T. 6, № 5. – S. 88–90.

6. Cherepanska I. Automated Technological Complex to Precise Angles Measurement Based on Goniometer / I. Cherepanska, E. Bezvesilna, A. Sazonov, A. Lavrischev // Technological Complexes. – 2015. – № 1/2 (12). – P. 38–45.

7. Cherepanska I. The procedure for determining the number of measurements in the normalization of random error of an information-measuring system with elements of artificial intelligence / Irina Cherepanska, Elena Bezvesilna, Artem Sazonov, Sergey Nechai, Tatiana Khylchenko // Eastern-European journal of enterprise technologies. – 2017. – № 5/9 (89). – R. 58–67.

8. Analiticheskij paket Deductor Professional : [rukovodstvo pol'zovatelja]. – BaseGroupLabs, 2002. – 184 s.

Рецензія/Peer review : 17.1.2019 р. Надрукована/Printed :16.2.2019 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Полонський Л. Г.

DOI 10.31891/2307-5732-2019-269-1-145-154
УДК 602.1:519.85:53.082.9:616-07

А.С. СВЕРСТЮК
ДВНЗ «Тернопільський державний медичний університет імені І. Я. Горбачевського МОЗ України»

КІБЕРФІЗИЧНІ БІОСЕНСОРНІ ТА ІМУНОСЕНСОРНІ СИСТЕМИ

Розглянуто основні підходи, які лежать в основі розробки кіберфізичних біосенсорних та імуносенсорних систем. Проведена класифікація розроблюваних систем на основі чутливих елементів та з використанням різних режимів фізико-хімічного перетворення вимірювальної величини. Наведено технічні стратегії, що застосовуються для розробки біосенсорних та імуносенсорних систем, які засновані на виявленні біомаркерів з використанням і без використання міток. Узагальнено біосенсорні та імуносенсорні системи відносно принципів їх роботи та областей застосування. Розглянуто підхід до розробки кіберфізичних біосенсорних та імуносенсорних систем з використанням дискретної популяційної динаміки, яку поєднано з динамічною логікою, що використовується для дискретних подій.

***Ключові слова**: кіберфізична система, біосенсорна система, імуносенсорна система, види фізико-хімічного перетворення вимірювальної величини.*

A.S. SVERSTIUK
SHEI "I. Ya. Gorbachevsky Ternopil State Medical University of MH of Ukraine"

CYBERPHYSIC BIOSENSORS AND IMMUNOSENSORS SYSTEMS

The main approaches underlying the development of cyberphysical biosensory and immunosensory systems are considered. The classification of developed systems based on sensitive elements and using different modes of physic-chemical transformation of the measuring quantity is carried out. The basic technical characteristics of cyberphysical biosensory and immunosensory systems are considered. The technical strategies used to develop biosensor and immunosensory systems based on the identification of biomarkers with and without the use of labels are presented. The paper deals with electrochemical, optical, silicon oxide based on nanomaterials, genetically encoded and cellular, cyberphysical biosensory and immunosensory systems developed using synthetic biology and genetic engineering. The biosensor and immunosensory systems are generalized, in relation to the principles of their work and areas of application. An approach to the development of cyberphysical biosensory and immunosensory systems using discrete population dynamics is considered, which is combined with the dynamic logic used for discrete events. A class of latency lattice differential equations that simulates the interaction of antigens and antibodies in immunopixels is used. The spatial operator simulates the interaction of the type of diffusion between the immunopips. The result of numerical simulation of the electronics signal from the converter of the cyberphysical immunosensory system, which characterizes the number of fluorescing pixels, is presented. The considered immunosensors are presented as a two-dimensional array of immunopicles. To take into account the continuous dynamics of the immunological response, each immunopixel is considered as a cyberphysical immunosensory system. The result of numerical modelling of the cyberphysical immunosensory system, in which there is a chaotic wave of fluorescing pixels, is presented.

***Key words:** cyberphysical system, biosensor system, immunosensory system, types of physic-chemical transformation of the measuring quantity.*

Вступ. Стрімкий розвиток науки і техніки потребує появи нових методів детекції. Тому в науці та промисловості зростає інтерес до кіберфізичних систем (КФС), які є фізичними системами з можливістю інтеграції обчислень та фізичних процесів. Функціонування КФС тісно пов’язане з роботизованими та сенсорними системами, які обладнані «розумними» механізмами з достатніми обчислювальними можливостями для ефективного керування. Завдяки постійному науковому прогресу, КФС зазнають періодичних змін, які покращують зв'язок між фізичними та обчислювальними компонентами за допомогою «розумних» механізмів, покращуючи таким чином здатність до адаптації, підвищуючи автономність, ефективність, надійність, безпечність та розширюючи їх функціональність.

У останні роки ефективно використовуються кіберфізичні біосенсорні та імуносенсорні системи (КФБСІСС), які є альтернативою відомим методам вимірювання, що характеризуються поганою вибірковістю, високою вартістю, поганою стабільністю, повільною реакцією і часто можуть бути виконані тільки високо підготовленим персоналом. Це нове покоління давачів, які використовують в конструкції біологічний матеріал, що забезпечує дуже високу селективність та дає змогу швидко і просто проводити вимірювання [1].

Мета дослідження. Провести класифікацію КФБСІСС на основі чутливих елементів та з використанням різних режимів фізико-хімічного перетворення вимірювальної величини. Навести технічні стратегії, що застосовуються для розробки біосенсорних та імуносенсорних систем, які засновані на виявленні біомаркерів з використанням і без використання міток. Узагальнити КФБСІСС, відносно принципів їх роботи та областей застосування.

Аналіз останніх досліджень. Для кількісної оцінки інфікування організму за допомогою певних електрохімічних чи оптичних явищ у КФС використовуються клітинні біосенсори. У роботі [2] описано клітинний біосенсор, в якому використано електрохімічну імпедансну спектроскопію. Цей біосенсор призначений для підрахунку людських клітин CD4+. Область його зондування включає електродні пікселі, кожний з яких дорівнює за розміром клітині CD4+, захопленій пікселями електроду. Ці клітини виявляють шляхом спостереження за інформативними змінами на пікселі. Стан «ввімкнено» або «вимкнено» електродного пікселя вказує на виявлення однієї CD4+ клітини. Отже, щоб підрахувати клітини CD4+, потрібно підсумувати електродні пікселі в стані «ввімкнено».

Цей загальний підхід до кількісного виявлення клітин використано для моделювання імуносенсорної системи, в основі якої лежить явище флуоресценції. Імуносенсори [3] є підгрупою біосенсорів, в яких відбувається імунохімічна реакція, пов'язана з перетворювачем. Принцип роботи усіх імуносенсорів полягає в специфічному молекулярному розпізнаванні антигенів антитілами для утворення стабільних комплексів.

Найчастіше КФС розробляються у вигляді вбудованих систем і мереж для моніторингу та контролю фізичних процесів в системах зі зворотнім зв'язком. У таких системах динаміка фізичних процесів є джерелом інформації досліджуваного явища з можливістю контролю та розрахунку сигналів керування об'єктом [4]. Кібер-фізичні системи ототожнюють з проявом четвертої промислової революції, яка відбувається в сучасному світі [5]. Існує також фізична можливість використання технологій «Internet of Things (Інтернет речей)», коли необхідно використовувати сигнали від давачів і вимірювальних приладів.

Таким чином, з'являється все більше публікацій, які привертають увагу до сучасних концепцій та пропонують нові інноваційні рішення. Наприклад, у роботі [6] А. Платцер запропонував підхід на основі «динамічної логіки», де описано та проаналізовано КФС. У багатьох роботах використано гібридні програми (ГП) простою мовою програмування з простою семантикою, які дають змогу програмісту звертатись безпосередньо до дійсних значень змінних, що є реальними величинами і визначають їх динаміку.

Термін «Кібер-фізична сенсорна система (КФСС)» [6] був введений для промислового застосування давачів. Загальне визначення КФСС передбачає «більш високий ступінь поєднання, розподілення системи, можливість використовувати вбудовані системи в області автоматизації та дотримання діючих стандартів». Розглянутий підхід використано для характеристики КФІСС, що дає змогу виконати його чисельне моделювання.

У КФБСІСС фізично виміряні імунологічні показники перетворюються у цифрову інформацію, яка дає змогу проводити обробку сигналів в часі, використовуючи певні алгоритми.

В імуносенсорних пристроях використовуються чотири основні види детектування: електрохімічний (потенціометричний, амперометричний, ємнісний), оптичний, мікрогравіметричні та термометричні [3]. Усі типи сенсорів можуть використовуватися, як прямі (немарковані) або як непрямі (марковані) імуносенсори. Прямі сенсори здатні виявляти фізичні зміни під час утворення імунного комплексу, в той час як непрямі, використовують різні рівні генерованого сигналу, які дають змогу більш чутливо та універсально проводити детектування у вимірювальних системах.

КФБСІСС є високо інтелектуалізованими інформаційними системами. Вони використовують доступний набір інтерфейсів, які дають змогу отримувати швидку та достовірну інформацію про стан та внутрішні дані системи, доступні для інших КФС. Згідно з [7] КФБСІСС як самоорганізуюча система потребує всебічних знань про власну динамічну структуру та інфраструктуру загальної системи. Для цього необхідно визначити типи імуносенсорних пристроїв, враховуючи їх функціональне застосування. Наприклад, імуносенсори можна використовувати для оцінки критичних станів при серцево-судинних захворюваннях, об'єму інсуліну при вимірюванні вмісту глюкози в крові та виявлення кількісних показників у деяких фармацевтичних сполуках [8–10].

Мобільні КФБСІСС є перспективним напрямком досліджень та розробки. В якості прикладів можна навести мобільні електроні пристрої, які можуть переноситися людиною. Зростання популярності смартфонів призвела до підвищення цікавості через можливість застосування їх в КФБСІСС у зв'язку із можливістю використання їх надзвичайних обчислювальних потужностей, різних способів отримання та виведення інформації (сенсорні екрани, камери, GPS-чіпи, світлові датчики, сенсори руху), зручні комунікаційні механізми для виходу в Інтернет (WiFi, 3G), наявність каналів поширення додатків (Google Play Store та Apple App Store).

Для вирішення задач, які потребують більших ресурсів, ніж наділені КФБСІСС, можна використовувати підключення до мобільних систем або хмарних сервісів, що мають достатньо потужностей. Прикладами мобільних КФБСІСС є додатки, які відстежують та аналізують викиди CO_2, проводять моніторинг біологічних показників людини.

Підходи до розробки КФБСІСС. При розробці КФБСІСС використовують технічні підходи [11], які засновані на виявленні біомаркерів з використанням і без використання міток. Детектування з використанням міток засноване переважно на специфічних властивостях мічених з'єднань, що застосовуються для прицільного виявлення. КФБСІСС такого типу надійні, проте часто вимагають комбінації специфічних чутливих елементів, що виготовляються з використанням іммобілізованого білка-мішені. З іншого боку, методи [12, 13], що не використовують міток дають змогу виявляти молекули-мішені, не придатні для маркування. Останні міждисциплінарні підходи в галузі біотехнології та біоінженерії, електротехніки та електроніки зумовили розробку КФБСІСС, які не використовують маркери для різних методів виявлення з широким спектром напрямків застосування в області медицини, моніторингу якості продуктів харчування, оборонної промисловості та охорони навколишнього середовища.

Основні технічні характеристики КФБСІСС. Розглянемо основні технічні характеристики КФБСІСС згідно з [14].

1. Селективність є найважливішою характеристикою КФБСІСС, що вказує на його здатність відрізняти одну речовину від інших. Селективність визначається розпізнавальним елементом сенсора, хоча в ряді випадків на неї впливають і характеристики трансдьюсера.

2. Чутливість – найменша концентрація, що може бути визначена КФБСІСС. Як правило, чутливість КФБСІСС повинна бути нижчою за 1 ммоль, але в деяких випадках вона може досягати декількох фемтомолів (10^{-15} моль).

3. Точність. КФБСІСС повинна забезпечувати точність вимірювань, тобто результат, що одержують, має бути близьким до істинного значення.

4. Відтворюваність – це міра того, як повторюються результати при багаторазовому проведенні вимірювань КФБСІСС одним способом, а точність характеризує правильність отриманих результатів.

5. Природа розчину. Характеристики КФБСІСС можуть змінюватися залежно від pH, температури та іонної сили розчину.

6. Час відгуку – це той час, який потрібен для того, щоб КФБСІСС прийшла до стану рівноваги зі сполукою, що визначається.

7. Час регенерації – це час, необхідний для повернення КФБСІСС у початковий стан, коли його знову можна використовувати для вимірювання.

8. Термін експлуатації КФБСІСС визначається стабільністю розпізнавального елемента. Для КФБСІСС він може становити від декількох днів до місяців.

Розглянемо наступні види КФБСІСС: електрохімічні; оптичні; на основі оксиду кремнію; на основі наноматеріалів; генетично кодовані та клітинні, розроблені за допомогою синтетичної біології та генетичної інженерії [15].

Електрохімічні КФБСІСС. Створення глюкометра на основі глюкозооксидазного біосенсора [16] є першим кроком в історії розробки електрохімічних КФБСІСС. Такі системи дуже популярні в клініках і діагностичних установах, так як вони необхідні для періодичного моніторингу рівня глюкози в крові пацієнтів з цукровим діабетом. Однак ці КФБСІСС мають недоліки в силу нестабільної активності або негомогенності ферменту [17], яка зумовлює важливість додаткового калібрування. Фактично ці потенційні недоліки привели до розробки спектру біомолекул [11], які володіють різними електрохімічними властивостями, що зумовило появу більш стабільно працюючих КФБСІСС глюкози. Останнім часом електрохімічні КФБСІСС [18], як правило, виготовляються шляхом модифікування поверхні металевих і вуглецевих електродів з використанням біоматеріалів, таких як ферменти, антитіла або ДНК. Вихідний сигнал КФБСІСС зазвичай генерується в результаті специфічних реакцій зв'язування або каталітичних реакцій між матеріалами [18] на поверхні електроду. Необхідність розробки електрохімічних КФБСІСС стала особливо актуальна для клінічної діагностики захворювань [7–9, 19], в яких велике значення має раннє виявлення або довготривалий моніторинг біологічних показників. В даному контексті для розробки неферментативних КФБСІСС замість білків використовуються синтетичні матеріали. Цікавим є той факт, що різні типи біомолекул володіють різною стабільністю і вибірковістю, що в кінцевому підсумку дає змогу розробляти нові типи електрохімічних КФБСІСС для різних цілей. Ще одним сучасним винаходом є КФБСІСС для оцінки рівнів активних форм кисню в фізіологічних системах [20]. Залежно від сфери застосування були розроблені різні типи електрохімічних КФБСІСС.

Оптичні КФБСІСС. Відомо, що біомедицина та екологія вимагають розробки простих, швидко працюючих і високочутливих КФБСІСС. Це може бути реалізовано за допомогою іммобілайзерів [11, 21–25], які можуть виготовлятися із золота, матеріалів на основі вуглецю, кварцу або скла. Використання золотих наночастинок або квантових точок з використанням мікротехнологічних методів являє собою нову технологію розробки високочутливих і портативних КФБСІСС на основі ферменту цитохрому P450 для застосування в певних цілях. Більш того, оптоволоконні хімічні сенсори дуже актуальні для різних областей, таких як пошук нових лікарських засобів, біозондування і біомедицини. Останнім часом гідрогелі, що застосовують в якості сенсорів на основі ДНК (дезоксирибонуклеїнова кислота), набувають популярності в якості матеріалів для іммобілізації в оптоволоконній хімії [25]. У порівнянні з іншими матеріалами іммобілізація в гідрогелі відбувається а трьох вимірах, що забезпечує завантаження великої кількості чутливих молекул. Гідрогелі (поліакриламід) представляють собою гідрофільні полімери [26] з поперечними зв'язками, яким для іммобілізації можна надавати різні форми, починаючи від тонких плівок і закінчуючи наночастинками. Гідрогелі вважаються простим субстратом для іммобілізації ДНК, які мають низку переваг, таких як можливість утримання молекул, їх контрольованого вивільнення, збагачення аналітів і захисту ДНК. Ці характеристики унікальні для гідрогелів в порівнянні з іншими матеріалами, придатними для біомолекулярної іммобілізації [26]. Більш того, хороша оптична прозорість гідрогелів надає можливість застосування зручної стратегії візуального виявлення. Методи іммобілізації ДНК-КФБСІСС [26] в монолітних поліакриламідних гелях і гелевих мікрочастинках часто розглядаються як технічне досягнення в області кіберфізичних технологій. Виявлення одиничних молекул для ідентифікації ДНК також стало можливим за допомогою електрохімічного окислення гідрозину [27].

КФБСІСС на основі оксиду кремнію. Пошук нових методів розробки КФБСІСС привів до використання унікальних властивості матеріалів з оксиду кремнію, кварцу і скла. Серед цих матеріалів особливе місце займають наноматеріали на основі оксиду кремнію, що володіють найбільш високим потенціалом для використання у виробництві КФБСІСС завдяки своїй біосумісності, доступності, а також електронним, оптичним та механічним властивостям. Більш того, такі матеріали нетоксичні, що є дуже важливою умовою для біомедичних і біологічних сфер застосування. Матеріали на основі оксиду кремнію [22, 23] можуть використовуватися для біовізуалізації, біосенсорного аналізу та для лікування онкологічних

захворювань. Крім цього флуоресцентні матеріали на основі оксиду кремнію вже давно застосовуються в біовізуалізації. Цікавим є той факт, що нанопроводи з оксиду кремнію в комбінації з золотими наночастинками є гідридні структури [23], що застосовуються в рамках революційних підходів до лікування онкологічних захворювань. Ковалентне прикріплення модифікованих тіолами олігомерів ДНК до оксиду кремнію або скла забезпечує формування ДНК-плівок, що підвищують ефективність УФ-спектроскопії і методів гібридизації [26]. Незважаючи на безліч переваг застосування наночасток з оксиду кремнію, існує цілий ряд труднощів, які потребують вирішення. Серед них слід відзначити розробку методів великомасштабного малозатратного виробництва, а також біосумісності після біомолекулярного контакту. Вирішення цих питань забезпечить можливість перетворення наноматеріалів на основі оксиду кремнію в компоненти сучасних КФБСІСС.

Унікальні характеристики матеріалів на основі оксиду кремнію дали змогу розробити кілька нових високотехнологічних КФБСІСС для удосконалення вимірювальних приладів, що застосовуються в області біомедичних технологій [11, 21–23].

КФБСІСС на основі наноматеріалів. Для іммобілізації КФБСІСС використовується широкий спектр наноматеріалів, в тому числі наночастинки золота, срібла, оксиду кремнію і міді, а також матеріали на основі вуглецю, такі як графіт, графен і вуглецеві нанотрубки [13, 21, 28, 29, 30–33]. При розробці електрохімічних та інших КФБСІСС матеріалів на основі наночастинок забезпечується висока чутливість та специфічність. Серед металевих наночастинок для практичного використання найбільш придатні золоті наночастинки, стійкі до окислення [34] і практично нетоксичні. У той же час наночастинки з інших металів, таких як срібло, при введенні в організм, наприклад, для доставки препаратів, окислюються і надають токсичну дію. В цілому застосування наноматеріалів у біомедичних КФБСІСС асоційоване з потенційними складнощами [35]. Більш того, підходи підсилення сигналу за допомогою наночастинок мають потенційні переваги і недоліки [36]. Проте, наноматеріали вважаються важливими компонентами КФБСІСС, завдяки їх здатності підвищувати чутливість і пороги виявлення при детектуванні одиничних молекул [11]. В якості прикладу можна навести використання наночастинок на основі платини для електрохімічної ампліфікації з однорівневою реакцією для виявлення низької концентрації ДНК [27]. Аналогічним чином напівпровідникові квантові точки та нанокристали з оксиду заліза, що володіють як оптичними, так і магнітними властивостями, можна ефективно пов'язувати з пухлиноспецифічними лигандами, такими як моноклональні антитіла, пептиди або малі молекули, для прицільного впливу на пухлинні антигени з високою афінністю та специфічністю [37]. Технологія квантових точок може застосовуватися при вивченні пухлинного мікрооточення при проведенні терапії, а також для транспортування нанопрепаратів.

Генетично кодовані КФБСІСС. Розробка мічених КФБСІСС із використанням генетично кодованому чи синтетичної флуоресценції надала можливість вивчати біологічні процеси, в тому числі різні молекулярні шляхи всередині клітин [39–41]. Фактично метод виявлення мічених флуоресценцією антитіл вперше був розроблений для отримання зображень фіксованих клітин [40]. Ця стратегія надала нові можливості розробки таких КФБСІСС з використанням біологічних білків і малих молекул, що зв'язуються з аналітичними і вторинними месенджерами. Згодом були розроблені флуоресцентні КФБСІСС для аналізу рухових білків, що використовують метод виявлення поодиноких молекул при певній концентрації аналіту [39]. Незважаючи на ці переваги, методологія виявлення і аналізу міток виглядає складною. Винахід зеленого флуоресцентного білка та інших флуоресціюючих білків надало ряд переваг з точки зору дизайну та ефективності оптичного зонду [40]. За останнє десятиліття генетично закодовані КФБСІСС, специфічні до молекул, які залучені в синтез енергії активних форм кисню і АТФ (аденозинтрифосфат) дали змогу краще вивчити фізіологію мітохондрій. АТФ є важливою сигнальною молекулою і терапевтичної мішенню для серцево-судинної системи. З огляду на це КФБСІСС, що функціонують на основі методу резонансного переносу енергії флуоресценції, були розроблені для візуалізації АТФ та іонів кальцію всередині клітини. Деякі з таких КФБСІСС ефективно застосовуються для in vivo візуалізації в первинних культурах і живих клітинах [40, 41]. На сьогоднішній день опрацьовано досить багато аспектів розробки КФБСІСС для візуалізації в умовах живого організму. З'явилися в результаті оптимізації таких підходів малокутове розсіювання рентгенівських променів для розробки кальцієвих каналів і резонансний перенос енергії флуоресценції визнані найкращими КФБСІСС методиками в сучасній фізіології [40]. Таким чином був розроблений ряд специфічних до певних мішеній КФБСІСС на основі мікроорганізмів (бактерій) і клітинних органел [42]. Як пояснювалося раніше, електрохімічні, електромеханічні і оптичні КФБСІСС розробляються для більш ефективного, в порівнянні з іншими молекулярними методиками, виявлення мікроРНК. Таким чином був розроблений ряд специфічних до певних мішенів КФБСІСС на основі мікроорганізмів (бактерій) і клітинних органел [44].

Завдяки появі in vivo візуалізації за допомогою КФБСІСС малих молекул з'явилася можливість краще зрозуміти клітинну активність та механізми дії багатьох інших молекул, в тому числі ДНК, РНК та мікроРНК. Перспективним напрямком є використання оптичних КФБСІСС. Вважається, що на сучасному етапі оптичні КФБСІСС при поєднанні технології флуоресценції та використання наноматеріалів, дають змогу отримувати кращі результати з точки зору застосування і чутливості.

Клітинні КФБСІСС. Протягом останніх років для моніторингу стану навколишнього середовища та біологічної очистки застосовуються останні інноваційні технології, які засновані на генетичній інженерії та синтетичній біології. Такі підходи використовуються для програмування мікроорганізмів, наділяючи їх

специфічними вихідними сигналами, чутливістю та селективністю. Наприклад, живі клітини, що володіють ферментативною активністю, що забезпечує деградацію ксенобіотичних з'єднань, будуть мати широке застосування для біологічної очистки [45]. Також були розроблені КФБСІСС на мікробному паливі для моніторингу біохімічної потреби в кисні і токсичності в навколишньому середовищі. Бактерії мають потенціал деградувати органічний субстрат і генерувати електричний сигнал для ферментації. По суті технологія полягає у використанні біоелектрохімічних пристроїв, що регулюють силу мікробного дихання для конвертації органічних субстратів безпосередньо в електричну енергію. Незважаючи на ці можливості, обмеження застосування мікробних КФБСІСС обумовлені низькою питомою потужністю з точки зору собівартості та експлуатаційних витрат. Завдяки останнім розробкам вдалося значно поліпшити продуктивність і знизити витрати за допомогою нових системних підходів, що дозволило створити на основі цих технологій платформу, яка володіє заданими властивостями клітинних КФБСІСС з автономними джерелами живлення [46, 47]. Ще однією областю використання клітинних КФБСІСС є їх застосування для виявлення пестицидів і важких металів [48], при якому еукаріотичні мікроорганізми мають перевагу перед прокаріотами. Це переважно зумовлено перевагою розробки цілоклітинних КФБСІСС [48] для виявлення токсичності пестицидів і важких металів з високою вибірковістю і чутливістю. Крім цього більш складні еукаріотичні мікроорганізми можуть володіти більш широким спектром чутливості до різних токсичних молекул і мають більшу спорідненість до вищих тварин. Мікробні КФБСІСС мають широкий спектр застосування, починаючи від моніторингу навколишнього середовища і закінчуючи виробництвом енергії. У майбутньому такі клітинні КФБСІСС [46, 47] матимуть більш широке застосування для моніторингу забруднення навколишнього середовища важкими металами та екологічної ефективності при виробництві електроенергії.

Порівняльний аналіз КФБСІСС. Проведемо порівняння КФБСІСС з точки зору фізико-хімічних методів, які лежать в основі вимірювання. Біовиробництво медичних систем забезпечує кращі результати з точки зору масового виробництва КФБСІСС. Електрохімічні та оптичні КФБСІСС є основними технологічними компонентами при розробці високоякісних систем. Сучасні оптичні технології з використанням наномеханічних КФБСІСС на основі технології поверхневого резонансу покладені в основу інноваційних ДНК-чипів для проведення специфічного і чутливого аналізу в режимі реального часу [49–51]. Переваги оптичних КФБСІСС головним чином полягають у високій швидкості проведення аналізу із можливістю забезпечення стійкості сигналу під час вимірювання. Основним недоліком при цьому є висока вартість, яка обумовлена певними вимогами до устаткування. Вирішення технічних проблем, таких як складність іммобілізації, особливо для біовиробництва, і необхідність стерильних умов, є критичним питанням для отримання максимальної користі від оптичних КФБСІСС.

Новітні досягнення в області технологій мікро- і нановиробництва забезпечили можливість розробки механічних пристроїв з рухомими деталями нанорозмірів [52]. Можливість виробництва таких структур із застосуванням процедур обробки напівпровідникових матеріалів об'єднали біофізичні і біоінженерні принципи в напрямку прогресу мікро- і наноелектромеханічних КФБСІСС, придатних для масового виробництва [52]. Матеріали на основі оксиду кремнію успішно використовуються після мічення флуоресціюючими агентами або золотими наночастинками. Незважаючи на те, що такі КФБСІСС володіють більш високою точністю при виявленні індивідуальних молекул, однак їх масове виробництво не є дешевим [22, 23]. На сьогоднішній день жодна з КФБСІСС технологій не дає змогу в режимі реального часу здійснювати одночасний кількісний аналіз великих масивів зразків, однак ефективне впровадження нанотехнологій може зробити це реальністю [25].

Ще одним важливим технічним досягненням в галузі розробки біосенсорних та імуносенсорних систем стала можливість створення генетично закодованих або синтетичних флуоресцентних КФБСІСС для аналізу молекулярних механізмів біологічних процесів [39–41].

Інтегровані стратегії з використанням сучасних технологій розробки КФБСІСС [15], починаючи від електрохімічних, електромеханічних, флуоресцентно оптичних і закінчуючи генетично модифікованими мікроорганізмами, є сучасними методами розробки досліджуваних систем (таблиця 1).

В цілому можна підсумувати, що для створення високочутливих мініатюрних пристроїв [49] потрібна розробка різних мікро- і нано-КФБСІСС платформ із залученням інтегрованих технологій, які використовують електрохімічний або оптичний біоелектронні принципи з комбінацією біомолекул або біологічних матеріалів, полімерів і наноматеріалів.

Підхід до розробки КФБСІСС. Розроблено модель КФБСІСС, для чого було використано загальну схему кіберфізичної сенсорної системи, яка запропонована в роботі [10]. Базова модель була змінена з метою врахування особливостей імуносенсорів, які розглянуті у вигляді двовимірного масиву імунопікселів.

В основі КФБСІСС покладено концепцію КФС з врахуванням особливостей інтелектуальних імуносенсорів. З додатковими навиками сенсорна система розширюється до КФБСІСС. Це дає змогу отримати більше діагностичної інформації про досліджуваний об'єкт.

Динамічне логічне моделювання КФБСІСС. З метою моделювання динамічної логіки КФБСІСС використано синтаксис, запропонований А. Платцером для загальної КФС [6]. Для КФС використовується мова програмування ГП, яка має більше особливостей, ніж диференціальні рівняння. Перший рівень ГП є динамічними програмами з наступною граматикою:

Таблиця 1

Класифікація КФБСІСС відносно принципів їх роботи та областей застосування.

№	Назва КФБСІСС	Фізико-хімічні методи, які лежать в основі вимірювання	Області застосування КФБСІСС
1.	КФБСІСС на основі електродів з іммобілізованою глюкозооксидазою	Електрохімічні методи з використанням окислення глюкози	Аналіз рівня глюкози в біологічних зразках
2.	КФБСІСС для вимірювання рівня гемоглобіну	Електрохімічні методи з використанням ферроценілборної кислоти	Надійний аналітичний метод для аналізу гемоглобіну
3.	КФБІСС для вимірювання рівня сечової кислоти	Електрохімічні методи	Для виявлення клінічний аномалій або захворювань
4.	КФБІСС на основі інгібування ацетилхолінестерази	Електрохімічні методи	Аналіз впливу пестицидів
5.	П'єзоелектронні КФБІСС	Електрохімічні методи	Виявлення органофосфатів і карбаматів
6.	Мікротехнологічні КФБІСС	Оптичні методи з використанням ферменту цитохрому P450	Для розробки лікарських препаратів
7.	КФБІСС на основі гідрогелю (поліакриламіду)	Оптичні методи	Для іммобілізації біомолекул
8.	КФБІСС на основі оксиду кремнію	Оптично-флуоресцентні методи	Біовізуалізація, біосенсорне виявлення і терапія онкологічних захворювань
9.	КФБІСС на кристалах кварцу	Електромагнітні методи	Для розробки ультрависокочутливих методів виявлення білків у рідинах
10.	КФБІСС на основі наноматеріалів	Електрохімічні або оптично-флуоресцентні методи	Для різноманітних областей застосування, в тому числі біомедицини, наприклад, в якості інструментів для діагностики
11.	Генетично закодовані або мічені флуоресцентним агентом КФБІСС	Флуоресцентні методи	Для вивчення біологічних процесів, в тому числі різних внутрішньоклітинних молекулярних систем
12.	КФБІСС на основі мікробіологічних елементів	Оптичні методи	Для моніторингу біохімічної потреби в кисні та токсичності в навколишньому середовищі, а також токсичності важких металів і пестицидів

$$\begin{aligned} a ::= V_{i,j}(n+1) &= V_{i,j}(n)\exp\{\beta - \gamma F_{i,j}(n-r) - \delta_x V_{i,j}(n-r)\} + \hat{S}\{V_{i,j}(n)\}, \\ F_{i,j}(n+1) &= F_{i,j}(n)\exp\{-\mu_y + \eta\gamma V_{i,j}(n-r) - \delta_y F_{i,j}(n)\} \& \Phi_t \end{aligned} \quad (1)$$

де $V_{i,j}(t)$ – концентрація аналітів в біопікселі $(i,\ j)$ в момент часу t; $F_{i,j}(t)$ – концентрація біологічно активних елементів в біопікселі $(i,\ j)$ в момент часу t; $\beta > 0$ – константа народжуваності для популяції антигенів; $\gamma > 0$ – ймовірнісна швидкість детектування, зв'язування та нейтралізації антигенів антитілами; $\mu_f > 0$ – стала смертності антитіл; β і δ_υ – додатні числа, а $r \geq 0$ означає запізнення негативного відгуку колоній антигенів.

Представимо еволюційне доменне обмеження Φ_t у вигляді формули логіки першого порядку дійсної арифметики, $\Phi_t \overset{def}{\equiv} V^{\min} \leq V_{i,j}(n) \leq V^{\max}$; $\wedge F^{\min} \leq F_{i,j}(n) \leq F^{\max} \wedge i, j = \overline{1, N} \wedge n > 0$

До моделі неперервної динаміки, що описується диференціальними рівняннями (1), додаємо динамічну логіку визначення станів флуоресценції для окремих біопікселів на основі перевірки виконання умови:

$$k_{fl} V_{i,j}(t) F_{i,j}(t) \geq \Theta_{fl},$$

де k_{fl} – коефіцієнт пропорційності інтенсивності флуоресценції до кількості контактів між аналітами та біологічно чутливими елементами;

Θ_{fl} – порогове значення, що визначає перехід до стану флуоресценції в біопікселі.

Функціонування імунопікселя (i, j) можна визначити двома станами щодо виникнення флуоресценції, а саме s_{fl} є станом флуоресценції, а $s_{non\,fl}$ – нефлуоресцентний стан. Використовуючи семантику логіки першого порядку стани s_{fl} і $s_{non\,fl}$ пікселя (i, j) можна визначити як $s_{fl}\Big| = k_{fl}V_{i,j}(t)F_{i,j}(t) \geq \theta_{fl}$, $s_{nonfl}\Big| = k_{fl}V_{i,j}(t)F_{i,j}(t) < \theta_{fl}$.

У комп'ютерних програмах відбуваються дискретні зміни , коли змінні приймають нові значення. Така ситуація відбувається у випадку виникнення явища флуоресценції в пікселі (i, j). При цьому стані змінній $s_{fl,i,j}$ присвоюється значення одиниці. Отже, відбувається дискретна стрибкоподібна зміна значення $s_{fl,i,j}$. Таким чином, отримуємо дискретну модель змін $s_{fl,i,j} := 1$. Використовуючи цю особливість, можна моделювати будь-який піксель, що є дискретним або неперервним.

Аналізуючи вигляд електричного сигналу на рис. 1 можна зробити висновок, що при зміні значення r якісно змінюється поведінка пікселів і усього імуносенсора. На рис. 1 наведено результат чисельного моделювання КФБСІСС при $r = 16$, який відповідає стійкому фокусу (спостерігається біжуча хвиля нефлуоресціюючих пікселів). Порогове значення для флуоресценції при цьому становить $\Theta_{fl} = 1{,}5$.

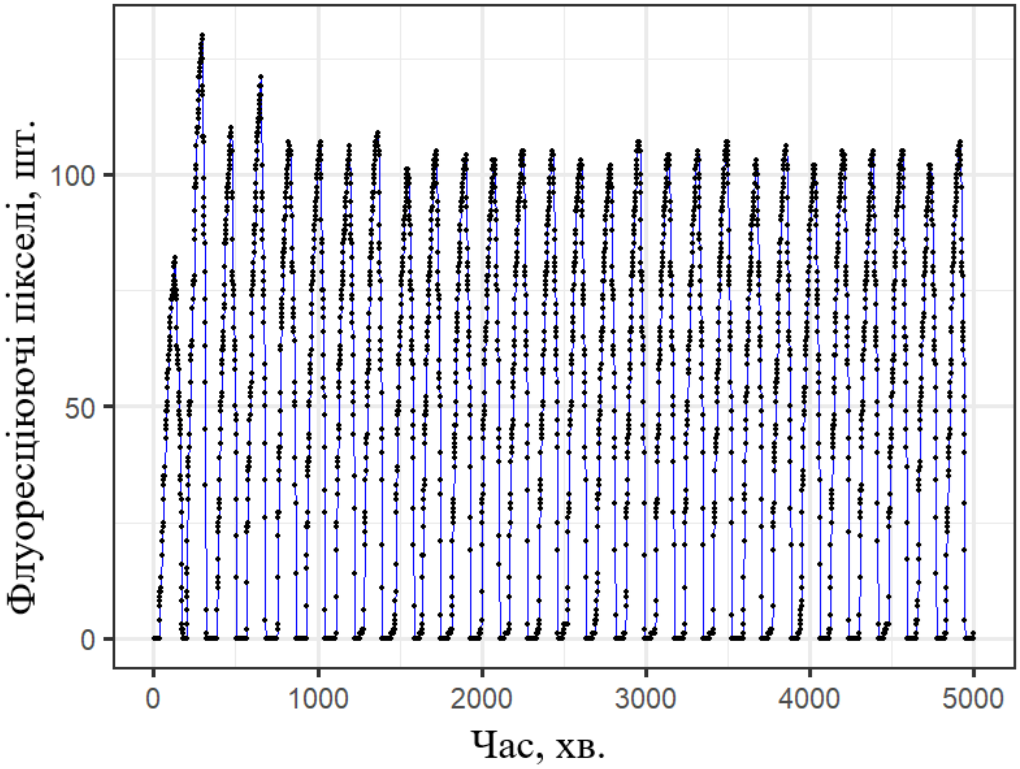


Рис. 1. Електричний сигнал з перетворювача в КФБСІСС, який характеризує число флуоресціюючих пікселів при r = 16

КФБСІСС проаналізовано за допомогою решітчастого графіку, що представляє флуоресцентні пікселі. При аналізі моделювання флуоресценції прийнято $\Theta_{fl} = 1{,}5$.

У випадку r =16 спостерігається хаотична поведінка, яка починається з хвилеподібних змін у флуоресціюючих пікселях (див. рис. 1) та швидко переходить до хаотичних змін. На рис. 2 наведено результат чисельного моделювання системи (1), при якому спостерігається хаотична хвиля флуоресціюючих пікселів.

Розглянуті імуносенсори представлені у вигляді двовимірного масиву імунопікселів. Для врахування неперервної динаміки імунологічної відповіді кожний імунопіксель розглянуто в якості КФБСІСС. Як показали результати числового аналізу, флуоресціюючі стани в імунопікселях змінюються відповідно до законів дискретної динаміки. В моделі враховано взаємодію імунопікселів між собою за допомогою дифузії антигенів.

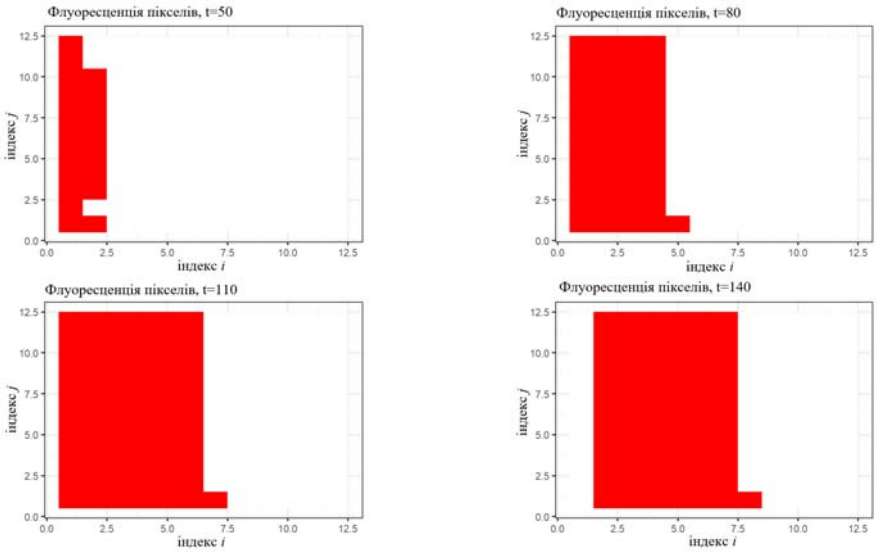


Рис. 2. Зображення флуоресценції в КФБСІСС для математичної моделі (1) як результат чисельного моделювання при $r = 16$

Висновки. Розробка КФБСІСС переважно спрямована на забезпечення чутливості, специфічності, відсутність токсичності, можливості виявлення малих молекул і економічної ефективності. Ці характеристики в кінцевому підсумку дозволять досягти необхідних критичних параметрів і усунути основні обмеження КФБСІСС технологій. Деякі досягнення, як це видно за комбінуванням електрохімічних підходів з наноматеріалів, призводять до появи нових типів КФБСІСС. З цієї точки зору слід зазначити винахід, що полягає в нанесенні на поверхню шкіри у вигляді тимчасового шару електрохімічних біосенсорів для визначення вмісту в організмі хімічних сполук.

У роботі розглянуто підхід до розробки КФБСІСС. Математичний опис КФБСІСС містить дискретну популяційну динаміку, яку поєднано з динамічною логікою, що використовується для дискретних подій. Використано клас решітчастих різницевих рівнянь із запізненням в часі, які моделюють взаємодію антигенів та антитіл в імунопікселях. Просторовий оператор моделює взаємодію типу дифузії між імунопікселями.

В цілому більш ефективна розробка КФС з поєднанням біовиробництва та методів синтетичної біології, які засновані на використанні електрохімічних, оптичних, біоелектронних принципів або їх комбінації є запорукою успішної розробки потужних КФБСІСС для сучасного життя.

Література

1. P. Mehrotra “Biosensors and their applications – a review,” Journal of Oral Biology and Craniofacial Research, vol. 6, no. 2, pp. 153–159, May 2016.

2. X. Jiang, M. G. Spencer “Electrochemical impedance biosensor with electrode pixels for precise counting of CD4+ cells: A microchip for quantitative diagnosis of HIV infec- tion status of AIDS patients,” Biosensors and Bioelectronics, vol. 25, no. 7, pp. 1622–1628, Mar. 2010.

3. P. B. Luppa, L. J. Sokoll, D. W. Chan “Immunosensors principles and applications to clinical chemistry,” Clinica Chimica Acta, vol. 314, no. 1, pp. 1–26, 2001.

4. E. A. Lee “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. Available at: https://www2.eecs.berkeley.edu/Pubs/TechRpts/2008/ EECS-2008-8.pdf.

5. J. Lee, B. Bagheri, H.-A. Kao “A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems,” Manufacturing Letters, vol. 3, pp. 18–23, 2015, ISSN: 2213- 8463. Available at: http://www.sciencedirect.com/science/ article/pii/S221384631400025X.

6. C. Berger, A. Hees, S. Braunreuther, and G. Reinhart “Characterization of cyber-physical sensor systems,” Procedia CIRP, vol. 41, pp. 638–643, 2016. Available at: https://doi.org/10.1016/j.procir. 2015.12.019.

7. 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.

8. Bihuniak T.V., Sverstiuk A.S., Bihuniak K.O. Deiaki aspekty vykorystannia imunosensoriv u medytsyni // Medychnyi forum. – 2018. – no. 14 (14). – pp. 8-11.

9. Martsenyuk V.P., Klos-Witkowska A., Sverstiuk A.S., Bihunyak T.V. On principles, methods and areas of medical and biological application of optical immunosensors // Medical informatics and engineering. – 2018. – № 2 (42). – p.28-36.

10. H.J. Cruz, C.C. Rosa, A.G. Oliva “Immunosensors for diagnostic applications,” Parasitology research, vol. 88, S4–S7, 2002.

11. I.A. Byely`x, M.F. Kleshhev Navchal`ny`j posibny`k „Biologichni ta ximichni sensorni sy`stemy`” Xarkiv NTU «XPI», 2011. – 143s.

12. Turner, A. P. (2013). Biosensors: sense and sensibility. Chem. Soc. Rev. 42, 3184–3196. doi:10.1039/c3cs35528d.

13. Citartan, M., Gopinath, S. C., Tominaga, J., and Tang, T. H. (2013). Label-free methods of reporting biomolecular interactions by optical biosensors. Analyst 138, 3576–3592. doi:10.1039/c3an36828a.

14. Sang, S., Wang, Y., Feng, Q., Wei, Y., Ji, J., and Zhang, W. (2015). Progress of new label-free techniques for biosensors: a review. Crit. Rev. Biotechnol. 15, 1–17. d oi:10.3109/07388551.2014.991270.

15. 15. Vigneshvar S., Sudhakumari C. C., Senthilkumaran Balasubramanian, Prakash Hridayesh Recent Advances in Biosensor Technology for Potential Applications – An Overview Frontiers in Bioengineering and Biotechnology Volume 4. 2016 P. 11. ISSN=2296-4185 DOI=10.3389/fbioe.2016.00011.

16. Clark, L. C. Jr., and Lyons, C. (1962). Electrode systems for continuous monitoring in cardiovascular surgery. Ann. N. Y. Acad. Sci. 102, 29–45. doi:10.111 1/j.1749-6632.1962.tb13623.x

17. Harris, J. M., Reyes, C., and Lopez, G. P. (2013). Common causes of glucose oxidase instability in in vivo biosensing: a brief review. J. Diabetes Sci. Technol. 7, 1030–1038.

18. Wang, B., Takahashi, S., Du, X., and Anzai, J. (2014). Electrochemical biosensors based on ferroceneboronic acid and its derivatives: a review. Biosensors (Basel) 4, 243–256. doi:10.3390/bios4030243.

19. Gruhl, F. J., Rapp, B. E., and Lange, K. (2013). Biosensors for diagnostic applications. Adv. Biochem. Eng. Biotechnol. 133, 115–148. doi:10.1007/10_2011_130.

20. Mello, L. D., Kisner, A., Goulart, M. O., and Kubota, L. T. (2013). Biosensors for antioxidant evaluation in biological systems. Comb. Chem. High Throughput Screen. 16, 109–120. doi:10.2174/138620713804806265.

21. Ogi, H. (2013). Wireless-electrodeless quartz-crystal-microbalance biosensors for studying interactions among biomolecules: a review. Proc. Jpn. Acad. Ser. B Phys. Biol. Sci. 89, 401–417. doi:10.2183/pjab.89.401.

22. Peng, F., Su, Y., Zhong, Y., Fan, C., Lee, S. T., and He, Y. (2014). Silicon nanomaterials platform for bioimaging, biosensing, and cancer therapy. Acc. Chem. Res. 47, 612–623. doi:10.1021/ar400221g.

23. Shen, M. Y., Li, B. R., and Li, Y. K. (2014). Silicon nanowire field-effect-transistor based biosensors: from sensitive to ultra-sensitive. Biosens. Bioelectron. 60, 101–111. doi:10.1016/j.bios.2014.03.057.

24. Schneider, E., and Clark, D. S. (2013). Cytochrome P450 (CYP) enzymes and the development of CYP biosensors. Biosens. Bioelectron. 39, 1–13. doi:10.1016/j. bios.2012.05.043.

25. Dias, A. D., Kingsley, D. M., and Corr, D. T. (2014). Recent advances in bioprinting and applications for biosensing. Biosensors (Basel) 4, 111–136. doi:10.3390/ bios4020111.

26. Khimji, I., Kelly, E. Y., Helwa, Y., Hoang, M., and Liu, J. (2013). Visual optical biosensors based on DNA-functionalized polyacrylamide hydrogels. Methods 64, 292–298. doi:10.1016/j.ymeth.2013.08.021.

27. Kwon, S. J., and Bard, A. J. (2012). DNA analysis by application of Pt nanoparticle electrochemical amplification with single label response. J. Am. Chem. Soc. 134, 10777–10779. doi:10.1021/ja304074f.

28. Li, M., Li, R., Li, C. M., and Wu, N. (2011). Electrochemical and optical biosensors based on nanomaterials and nanostructures: a review. Front. Biosci. (Schol Ed) 3:1308–1331. doi:10.2741/228.

29. Zhou, Y., Chiu, C. W., and Liang, H. (2012). Interfacial structures and properties of organic materials for biosensors: an overview. Sensors (Basel) 12, 15036–15062. doi:10.3390/s121115036.

30. Ko, P. J., Ishikawa, R., Sohn, H., and Sandhu, A. (2013). Porous silicon platform for optical detection of functionalized magnetic particles biosensing. J. Nanosci. Nanotechnol. 13, 2451–2460. doi:10.1166/jnn.2013.7406.

31. Senveli, S. U., and Tigli, O. (2013). Biosensors in the small scale: methods and technology trends. IET Nanobiotechnol. 7, 7–21. doi:10.1049/ iet-nbt.2012.0005.

32. Valentini, F., Galache, F. L., Tamburri, E., and Palleschi, G. (2013). Single walled carbon nanotubes/polypyrrole-GOx composite films to modify gold microelectrodes for glucose biosensors: study of the extended linearity. Biosens. Bioelectron. 43, 75–78. doi:10.1016/j.bios.2012.11.019.

33. Lamprecht, C., Hinterdorfer, P., and Ebner, A. (2014). Applications of biosensing atomic force microscopy in monitoring drug and nanoparticle delivery. Expert. Opin. Drug Deliv. 11, 1237–1253. doi:10.1517/17425247.2014.917078.

34. Hutter, E., and Maysinger, D. (2013). Gold-nanoparticle-based biosensors for detection of enzyme activity. Trends Pharmacol. Sci. 34, 497–507. doi:10.1016/j. tips.2013.07.002

35. Su, L., Jia, W., Hou, C., and Lei, Y. (2011). Microbial biosensors: a review. Biosens. Bioelectron. 26, 1788–1799. doi:10.1016/j.bios.2010.09.005.

36. Ding, L., Bond, A. M., Zhai, J., and Zhang, J. (2013). Utilization of nanoparticle labels for signal amplification in ultrasensitive electrochemical affinity biosensors: a review. Anal. Chim. Acta 797, 1–12. doi:10.1016/j.aca.2013.07.035.

37. Nie, S., Xing, Y., Kim, G. J., and Simons, J. W. (2007). Nanotechnology applications in cancer. Annu. Rev. Biomed. Eng. 9, 257–288. doi:10.1146/annurev. bioeng.9.060906.152025.

38. Jain, R. K. (2013). Normalizing tumor microenvironment to treat cancer: bench to bedside to biomarkers. J. Clin. Oncol. 31, 2205–2218. doi:10.1200/ JCO.2012.46.3653.

39. Kunzelmann, S., Solscheid, C., and Webb, M. R. (2014). Fluorescent biosensors: design and application to motor proteins. EXS 105, 25–47. doi:10.1007/978-3-0348-0856-9_2.

40. Oldach, L., and Zhang, J. (2014). Genetically encoded fluorescent biosensors for live-cell visualization

of protein phosphorylation. Chem. Biol. 21, 186–197. doi:10.1016/j.chembiol.2013.12.012.

41. Randriamampita, C., and Lellouch, A. C. (2014). Imaging early signaling events in T lymphocytes with fluorescent biosensors. Biotechnol. J. 9, 203–212. doi:10.1002/biot.201300195.

42. De, M. R., Carimi, F., and Frommer, W. B. (2014). Mitochondrial biosensors. Int. J. Biochem. Cell Biol. 48, 39–44. doi:10.1016/j.biocel.2013.12.014.

43. Su, T., Zhang, Z., and Luo, Q. (2012). Ratiometric fluorescence imaging of dual bio-molecular events in single living cells using a new FRET pair mVenus/ mKOkappa-based biosensor and a single fluorescent protein biosensor. Biosens. Bioelectron. 31, 292–298. doi:10.1016/j.bios.2011.10.034.

44. Johnson, B. N., and Mutharasan, R. (2014). Biosensor-based microRNA detection: techniques, design, performance, and challenges. Analyst 139, 1576–1588. doi:10.1039/c3an01677c.

45. Park, K., Jung, J., Son, J., Kim, S. H., and Chung, B. H. (2013). Anchoring foreign substances on live cell surfaces using Sortase A specific binding peptide. Chem. Commun. (Camb) 49, 9585–9587. doi:10.1039/c3cc44753g.

46. Du, Z., Li, H., and Gu, T. (2007). A state of the art review on microbial fuel cells: a promising technology for wastewater treatment and bioenergy. Biotechnol. Adv. 25, 464–482. doi:10.1016/j.biotechadv.2007.05.004.

47. Sun, J. Z., Peter, K. G., Si, R. W., Zhai, D. D., Liao, Z. H., Sun, D. Z., et al. (2015). Microbial fuel cell-based biosensors for environmental monitoring: a review. Water Sci. Technol. 71, 801–809. doi:10.2166/wst.2015.035.

48. Gutierrez, J. C., Amaro, F., and Martin-Gonzalez, A. (2015). Heavy metal wholecell biosensors using eukaryotic microorganisms: an updated critical review. Front. Microbiol. 6:48. doi:10.3389/fmicb.2015.00048.

49. Scheller, F. W., Yarman, A., Bachmann, T., Hirsch, T., Kubick, S., Renneberg, R., et al. (2014). Future of biosensors: a personal view. Adv. Biochem. Eng. Biotechnol. 140, 1–28. doi:10.1007/10_2013_251.

50. Wang, S., Poon, G. M., and Wilson, W. D. (2015). Quantitative investigation of protein-nucleic acid interactions by biosensor surface plasmon resonance. Methods Mol. Biol. 1334, 313–332. doi:10.1007/978-1-4939-2877-4_20.

51. Zhang, Z., Liu, J., Qi, Z. M., and Lu, D. F. (2015). In situ study of self-assembled nanocomposite films by spectral SPR sensor. Mater. Sci. Eng. C Mater. Biol. Appl. 51, 242–247. doi:10.1016/j.msec.2015.02.026.

52. Arlett, J. L., Myers, E. B., and Roukes, M. L. (2011). Comparative advantages of mechanical biosensors. Nat. Nanotechnol. 6, 203–215. doi:10.1038/ nnano.2011.44.

Рецензія/Peer review : 27.1.2019 р. Надрукована/Printed :16.2.2019 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Лупенко С.А.

DOI 10.31891/2307-5732-2019-269-1-155-161
УДК 004.056.55

А.В. ПРИЙМАК, О.В. САЛІЄВА, Я.Ю. ЯРЕМЧУК
Вінницький національний технічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ АЛГОРИТМУ ЦИКЛІЧНОГО НАДЛИШКОВОГО КОДУ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ СТІЙКОСТІ КРИПТОСХЕМИ ECIES

В роботі розглянуто проблему вразливості асиметричної криптосхеми ECIES до атаки малими підгрупами, а також досліджено можливість використання алгоритму циклічного надлишкового коду для підвищення її криптостійкості. Розроблено метод перевірки публічного ключа на справжність, який унеможливлює проведення успішної атаки *малими підгрупами і як результат* значно підвищує теоретичну стійкість даного криптоалгоритму. Проведене статистичне тестування запропонованої модифікації алгоритму показало *добру статистичну стійкість, оскільки результати тестів не виходять за межі 0.9–1. Так як запропонований метод є додатковим модулем алгоритму, то аналіз швидкодії прогнозовано показав незначне уповільнення роботи криптосхеми ECIES.*

Ключові слова: циклічний надлишковий код, криптографія, криптостійкість, ECIES, контрольна сума.

A.V. PRYIMAK, O. V. SALIEVA, Y.Y. YAREMCHUK
Vinnytsia National Technical University

INVESTIGATION OF THE POSSIBILITY OF USING OF THE CYCLIC REDUNDANCY CODE ALGORITHM FOR THE INCREASE OF THE ECIES CRYPTOSCHEME STABILITY

The problem of vulnerability of the asymmetric cryptoscheme ECIES to the small subgroups attack is considered, as well as the possibility of using an algorithm of cyclic redundancy code to increase its cryptostability. A method of checking the public key for authenticity is developed that makes it impossible to conduct a successful small subgroups attack, and as a result significantly increases the theoretical stability of this cryptographic algorithm. The essence of the modification is that when generating a public key, the checksum is automatically calculated for it. After exchanging keys, each user generates a check sum of his own public key. This checksum is added to the optional parameter when calculating the message tag using the MAC function. After receiving the message and verifying its tag, it is concluded that all the parameters that participated in its generation are identical. If the checksums do not coincide as a result of a public key substitution, the message tag will also be changed. In this case, it is concluded that the public key of one of the interlocutors has been changed during the exchange and the continued exchange of information with these public keys is dangerous and need to be replaced. The performed statistical testing of the proposed modification of the algorithm showed good statistical stability, since the results of the tests do not exceed 0.9-1, however, generally, both versions showed almost the same results in tests.

Keywords: cyclic redundancy code, cryptography, cryptoscope, ECIES, checksum.

Вступ

Криптографія призначена для передавання захищених даних через незахищену мережу в зашифрованому варіанті, щоб лише один із користувачів, якому призначена ця інформація, міг проаналізувати його. Зв'язок через повідомлення, електронні листи або різні інші режими вимагає високої безпеки. Криптографія еліптичної кривої (ECC) може використовуватися як засіб для шифрування даних, тобто таким чином зберігати конфіденційність вмісту. Серед великої кількості криптосистем, заснованих на ECC, найбільш відома схема інтегрованого шифрування з еліптичною кривою (ECIES), і її можна знайти в декількох криптографічних стандартах.

ECIES (з англ. Elliptic Curve Integrated Encryption Scheme) – це схема шифрування на відкритих ключах, заснована на еліптичних кривих. Ця схема була запропонована Віктором Шоупом в 2001 році. ECIES використовується в різних стандартах, наприклад, ANSI X9.63, IEEE 1363a, ISO 18033-2 та SECG SEC 1 [1, 2].

Безпека ECIES ґрунтується на обчислювальній складності задачі дискретного логарифмування в групі точок еліптичної кривої (ECDLP). Криптографічні алгоритми також можуть гуртуватися на обчислювальної складності завдань факторизації (приклад алгоритму: RSA) і дискретного логарифмування (схема Ель-Гамаля). Однак ECDLP вважається найскладнішою з цих трьох задач, що призводить до важливої переваги ECIES над іншими алгоритмами – невеликий розмір ключа [3].

Важливим недоліком ECIES в порівнянні з іншими криптографічними алгоритмами є існування кількох версій ECIES, описуваних різними стандартами (ANSI X9.63, IEEE 1363a, ISO/IEC 18033-2 і SECG SEC 1). Відмінності між даними стандартами – вибір конкретних функцій і параметрів для реалізації складових ECIES (KA, KDF, ENC, MAC, HASH). Недолік полягає в тому, що неможливо реалізувати версію ECIES, що задовольняє всім стандартам [4].

Попри ряд переваг, даний алгоритм має декілька недоліків [5, 6]:

Однією з відомих можливих атак на дану криптосхему є атака «М'яка вразливість».

Віктор Шоуп довів, що якщо публічний ключ U не включені у вхідні дані функції KDF і, якщо в KDF використовується тільки x-координата розділеного секрету, то ECIES піддається атакам на основі адаптивного шифротексту (Adaptive Chosen Ciphertext Attacks CCA2). Уразливість названа «м'якою», так як жодна з проведених практичних атак не змогла отримати значущу інформацію з використанням цієї

уразливості.

Одне з можливих рішень, запропонованих Шоупом – додати публічний ключ U у вхідні дані функції KDF.

Уразливість при використанні функції XOR.

Шоуп також довів, що схема ECIES може бути вразлива, коли функція XOR використовується при шифруванні повідомлень змінної довжини. Зокрема, це може привести до уразливості до атак на основі адаптивного шифротексту (Adaptive Chosen Ciphertext Attacks CCA2). Можливі рішення:

- зафіксувати довжину відкритого тексту;
- інтерпретувати вихідні дані функції KDF як $k_{ENC} \| k_{MAC}$;
- заборонити використання потокових фільтрів в ECIES (дозволити тільки блокові шифри).

Атака малими підгрупами. Найнебезпечніша відома практично реалізована атака на криптосхему ECIES. Даний тип атак можливий, коли противник спеціально надає невірний публічний ключ. Якщо відправник не перевіряє справжність публічного ключа іншого боку, то противник зможе підмінити публічний ключ на ключ меншого розміру з метою отримання розділеного секрету або отримання інформації про приватний ключ відправника.

У даній роботі розглядається недолік ECIES, пов'язаний з вразливістю до атак малими підгрупами і можливість використання алгоритму циклічного надлишкового коду для знаходження контрольної суми, для перевірки ключів на цілісність, і як результат на справжність, оскільки для проведення успішної атаки малими підгрупами зловмиснику необхідну замінити оригінальний ключ на ключ меншого розміру, що призведе до зміни контрольної суми і у випадку підміни публічного ключа отримувач не буде продовжувати операцію розшифрування.

Постановка задачі та методика дослідження

Провести дослідження криптоалгоритму ECIES щодо можливості використання циклічного надлишкового коду для підвищення його криптостійкості. Запропонувати метод перевірки публічного ключа на справжність за рахунок обчислення контрольної суми. Провести статистичне тестування запропонованого покращення алгоритму та порівняти результати з тестуванням оригінального алгоритму ECIES.

Метод перевірки публічного ключа на справжність

Розглянемо математичний апарат циклічного надлишкового коду. Циклічний надлишковий код (зокрема, CRC8, CRC16, CRC32) застосовується для перевірки цілісності передачі даних. Така контрольна сума проста в реалізації і забезпечує низьку ймовірність виникнення колізій. Циклічні надлишкові коди є частиною стандартів, найпопулярніший і рекомендований IEEE поліном для CRC-32 використовується в Ethernet, FDDI, крім того цей багаточлен є генератором коду Хеммінга [7].

Оцінюючи швидкодію алгоритму CRC-32, можна зробити висновки, що він є значно швидшим за криптографічні хеш-функції. Так, наприклад, для файлу розміром 1 Мб, час знаходження контрольної суми алгоритмом CRC-32 є 0.009 секунди, тоді коли алгоритму SHA-1 необхідно 0.022. Розмір контрольної суми алгоритму CRC-32 є в 5 разів меншим. Оскільки сам публічний ключ не повинен шифруватись і перебуває у відкритому доступі, то достатньо лише зберігати в секреті контрольну суму даного публічного ключа і при передачі даних отримувач буде мати змогу перевірити отриманий публічний ключ на справжність. Тому алгоритмом для обчислення контрольної суми публічного ключа було обрано – CRC-32.

Суть модифікації полягає в тому, що при генерації публічного ключа, для нього автоматично обчислюється контрольна сума C_{SUM}. Після обміну ключами кожен з користувачів генерує контрольну суму публічного ключа свого співрозмовника. Ця контрольна сума додається додатковим параметром при обчисленні тегу повідомлення за допомогою функції MAC. Після отримання повідомлення і перевірки його тегу робиться висновок про ідентичність усіх параметрів, які приймали участь у його генерації. Якщо контрольні суми не збігаються в результаті підміни публічного ключа, то тег повідомлення також буде змінений. В такому випадку робиться висновок, що публічний ключ одного з співрозмовників було змінено при обміні і продовжувати обмін інформацією з цими ж публічними ключами небезпечно і їх потрібно замінити.

Модифікована схема шифрування за алгоритмом ECIES складається з таких етапів:

1. За допомогою методу генерації загального секрету КА особа «А» обчислює загальний секрет $s = p_a * P_B$ (по протоколу Діффі - Хеллмана).

2. Використовуючи отриманий загальний секрет s sі метод отримання ключів з ключової і додаткової інформації KDF, особа «А» отримує ключ шифрування k_{ENC}, а також ключ для обчислення імітовставки k_{MAC}.

3. За допомогою симетричного алгоритму шифрування особа «А» шифрує вихідне повідомлення m ключем k_{ENC} і отримує шифротекст c. $c = E(m)$.

4. Особа «А» обчислює контрольну суму публічного ключа особи «Б» за алгоритмом CRC-32. В результаті отримується значення контрольної суми cs_{P_B}.

5. Взявши ключ k_{MAC}, зашифроване повідомлення c і контрольну суму публічного ключа особи «Б», особа «А» обчислює тег повідомлення за допомогою функції MAC. $tag = MAC(c; CS_{P_B})$.

6. Особа «А» відсилає особі «Б» $\{P_A, tag, c\}$ $\{P_A, tag, c\}$.

Процес дешифрування залишається без змін, за виключенням того, що одержувачу буде необхідно перевірити тег повідомлення разом з контрольною сумою.

Таким чином при можливій підміні публічного ключа зловмисником, на менший за розміром, його контрольна сума буде змінюватись і як результат буде змінюватись тег повідомлення.

Графічне представлення схеми роботи запропонованої модифікації зображено на рисунку 1.

Для порівняння швидкості шифрування повідомлення оригінальним алгоритмом ECIES і алгоритмом ECIES із вбудованим методом перевірки публічного ключа на справжність, за допомогою використання циклічного надлишкового коду, було обрано три різні ключі, довжинами 256, 384, 512 біт, а також повідомлення довжиною 10000 байт. Результати порівняння представлені в таблиці 1.

Виходячи з результатів наведених в таблиці 1, можна зробити висновок, що модифікований ECIES дещо сповільнює роботу алгоритму при шифруванні, оскільки саме на етапі шифрування генерується контрольна сума публічного ключа співрозмовника та додається до тегу повідомлення. Також варто зазначити, що результати швидкодії дешифрування оригінального і модифікованого алгоритмів ECIES суттєво не відрізняються. Різниця складає лише 2–4 мс.

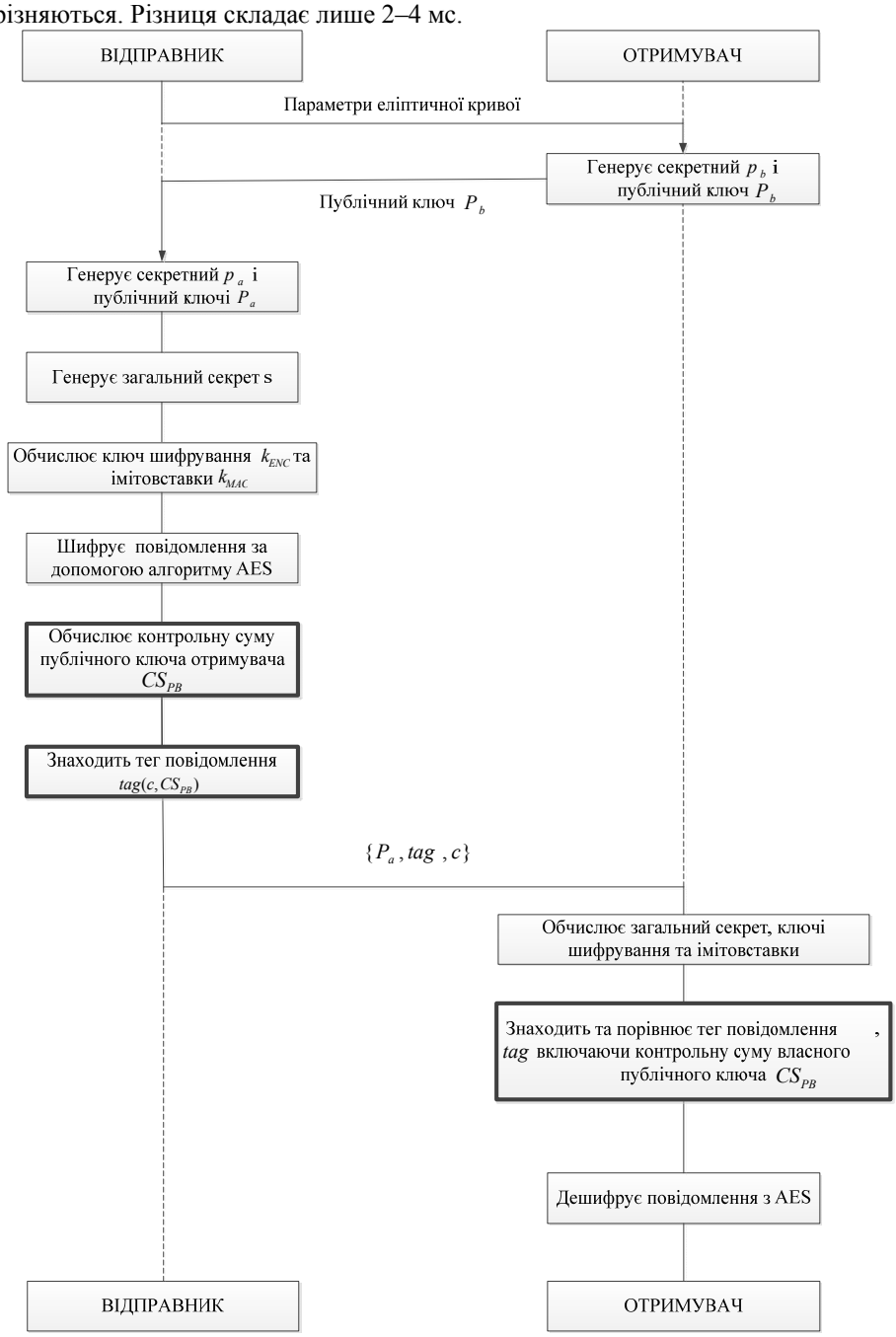


Рис. 1. Схема роботи модифікованого методу шифрування ECIES

Таблиця 1

Порівняння швидкості шифрування та дешифрування оригінального алгоритму та модифікованого

Довжина ключа (біт)	Час (мс)			
	Шифрування		Дешифрування	
	Оригінальний ECIES	Модифікований ECIES	Оригінальний ECIES	Модифікований ECIES
256	81	88	61	63
384	69	76	50	54
512	135	141	109	112

Графічні результати проведених статистичних замірів швидкодії оригінального алгоритму ECIES та модифікованого при використанні трьох різних за довжиною ключів для одного ж повідомлення розміром 10000 байт представлено на рисунку 2.

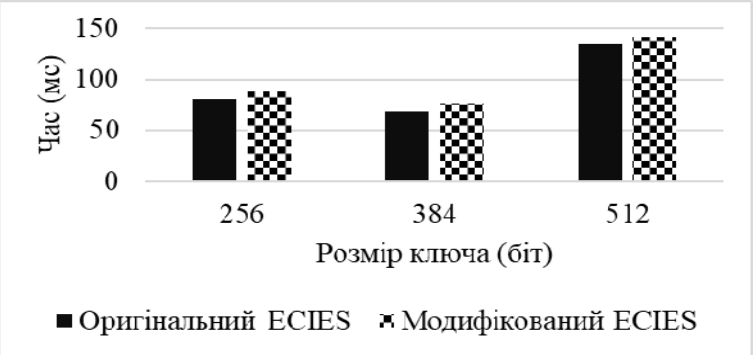


Рис. 2. Результати статистичних замірів швидкості шифрування оригінального алгоритму ECIES та модифікованого

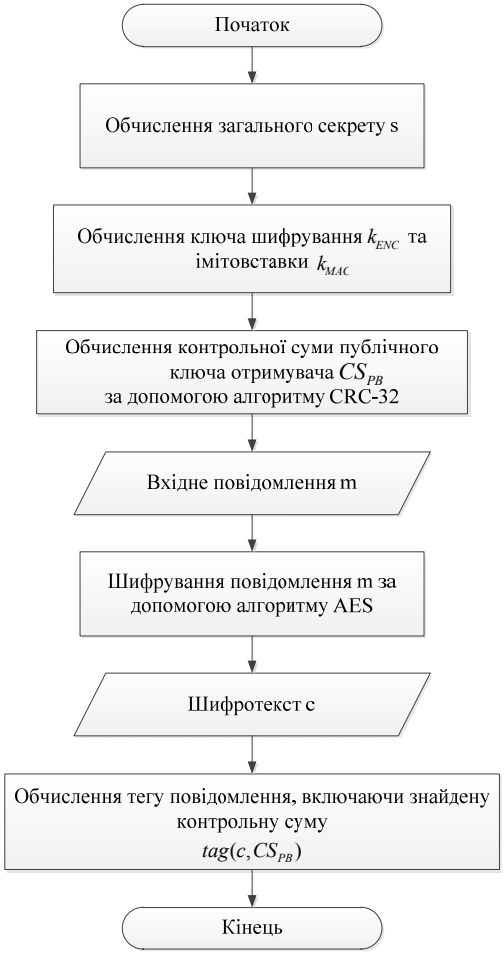


Рис. 3. Схема роботи алгоритму програми на основі запропонованого методу

Виходячи з результатів порівняння швидкості шифрування оригінальним алгоритмом ECIES та

модифікованим, можна зробити висновок, що запропонований метод перевірки публічних ключів на справжність дещо сповільнює роботу алгоритму.

У випадку реалізації роботи процесу шифрування ECIES, з використанням запропонованого методу перевірки публічного ключа на справжність за рахунок циклічного надлишкового коду на програмному рівні, блок-схема такого додатку буде мати такий вигляд (рис. 3):

Крім порівняння швидкості шифрування повідомлення оригінальним алгоритмом ECIES і алгоритмом ECIES із вбудованим запропонованим методом перевірки публічного ключа на справжність, доцільно також порівняти загальне навантаження на роботу процесора комп'ютера на якому відбувається той чи інший процес алгоритму.

Тестування проведено на двох операційних системах – Windows 10 та Linux/Ubuntu 18.02, з використанням процесора Intel Core i5 – 5350H, 2.4 ГГц. Результати порівняння наведені в таблиці 2.

Таблиця 2

Порівняння параметрів навантаження на процесор оригінального алгоритму та модифікованого ECIES

Розмір повідомлення для шифрування (байт)	Навантаження на процесор у Windows		Навантаження на процесор у Linux	
	Оригінальний ECIES	Модифікований ECIES	Оригінальний ECIES	Модифікований ECIES
256	0.26%	0.28%	0.16%	0.16%
384	0.31%	0.33%	0.18%	0.18%
512	0.36%	0.39%	0.23%	0.23%

З результатів порівняння, наведених вище, можна зробити висновок, що запропонований метод перевірки публічного ключа на справжність, не суттєво впливає на навантаження процесора при виконанні процесу шифрування і дешифрування. Отримана різниця в навантаженні знаходиться в межах 0.02–0.03% і так само як і в порівняльному аналізі швидкодії алгоритмів простежується залежність, що при зміні довжини ключів, різниця в навантажені майже не змінюється, тобто ця різниця є стала.

Для дослідження статистичної безпеки асиметричного алгоритму ECIES з вбудованим запропонованим методом перевірки публічного ключа на справжність за рахунок циклічного надлишкового коду буде використано пакет статистичних тестів NIST STS (National Institute of Standard and Technologies Statistical TestSuite). До його складу входять 15 статистичних тестів, метою яких є визначення міри випадковості двійкових послідовностей, породжених або апаратними, або програмними генераторами випадкових чисел. Ці тести побудовані на різних статистичних властивостях, притаманних тільки випадковим послідовностям [8].

Основними параметрами для проходження тестів було обрано:

– довжина ключа –512 біт;

– кількість тестів – 188.

В таблиці 3 представлена порівняльна характеристика результатів проходження усіх 15-и тестів оригінального алгоритму ECIES та з вбудованим методом перевірки публічного ключа на справжність.

Таблиця 3

Відсотки проходження кожного з 15 тестів для ключа довжиною 512 біт

Назва статистичного тесту	**Оригінальний ECIES**	**Модифікований ECIES**
Частотний (монобітний) тест	99%	97%
Частотний тест всередині блоку	97%	98%
Послідовний тест	98%	100%
Перевірка максимальної довжини серії в блоці	98%	96%
Перевірка рангу двійкової матриці	98%	98%
Спектральний тест на основі дискретного перетворення Фур'є	96%	99%
Перевірка шаблонів, які не перекриваються	98%	95%
Перевірка шаблонів, які перекриваються	98%	97%
Універсальний тест Маурера	95%	98%
Перевірка лінійної складності	98%	99%
Перевірка серій	98%	98%
Ентропійний тест	96%	98%
Перевірка накоплених сум	96%	93%
Перевірка випадкових відхилень	96%	99%
Перевірка випадкових відхилень (модифікація)	95%	98%

Як видно з результатів наведених у таблиці 3, оригінальний алгоритм показує дещо гірші показники порівняно з запропонованою його модифікацією.

Так, наприклад, частотний тест всередині блоку, послідовний тест, спектральний тест на основі дискретного перетворення Фур'є, універсальний тест Маурера, тест на перевірку лінійної складності, ентропійний тест, тест на перевірку випадкових відхилень та тест на перевірку випадкових відхилень (модифікація), показали, що модифікований алгоритм ECIES з вбудованим запропонованим методом перевірки публічного ключа на справжність має вищі показники на 1–3%.

Для наглядності доцільно також провести порівняння статистичних портретів модифікованого та оригінального алгоритму ECIES.

З рисунку 4 видно, що результати тестів модифікованого алгоритму ECIES не виходять за межі 0.9 - 1, що показує високу статистичну надійність даного методу. Даний результат свідчить про добру статистичну стійкість модифікованого алгоритму.

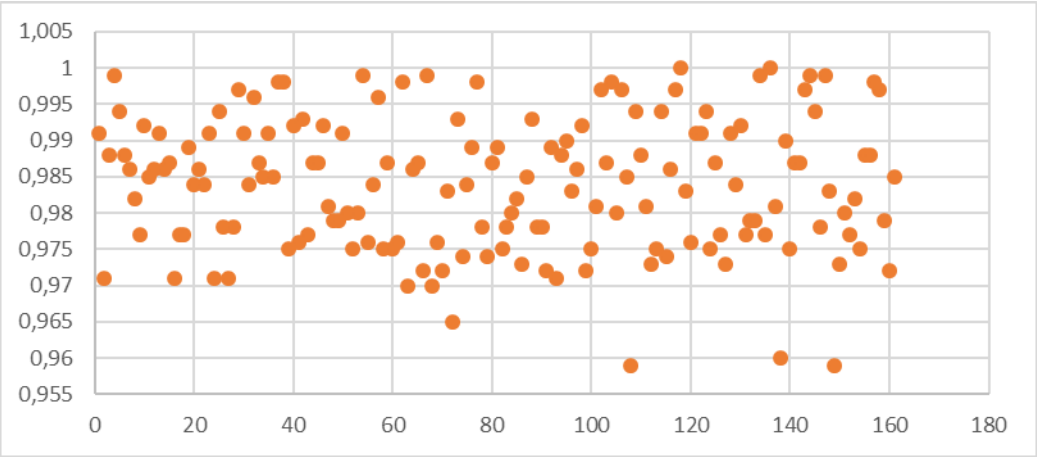


Рис. 4. Результати тестування модифікованого алгоритму ECIES

На відміну від результатів тестування модифікованого алгоритму, результати оригінального алгоритму ECIES (рис. 5) знаходяться в більш широкому діапазоні.

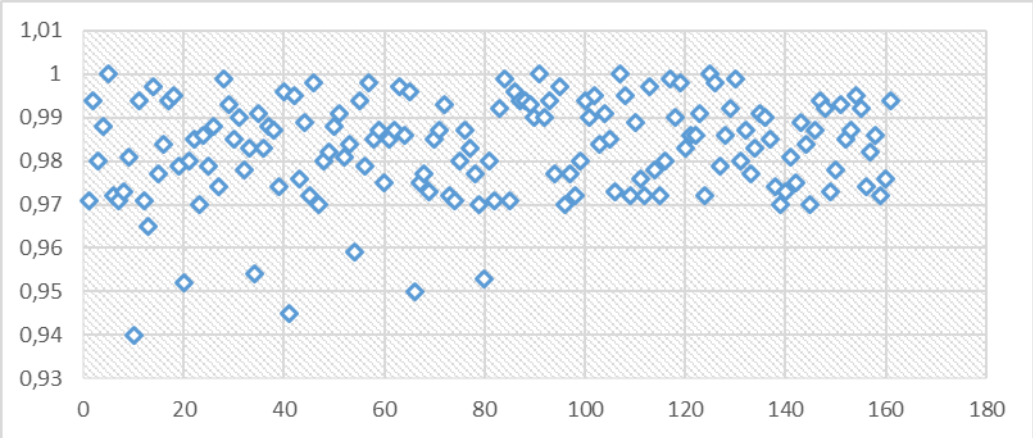


Рис. 5. Результати тестування оригінального алгоритму ECIES

На рисунку 6 представлено порівняння результатів тестування для кожного тесту з статистичного пакету NIST оригінального алгоритму і запропонованої модифікації.

Як видно з графіку на рисунку 5, алгоритм із вбудованим запропонованим методом перевірки публічного ключа на справжність показав кращі результати у більшості тестах.

Виходячи з наведених вище результатів статистичних тестів, можна зробити висновок, що модифікований алгоритм ECIES з вбудованим запропонованим методом перевірки публічного ключа на справжність за рахунок використання циклічного надлишкового коду має добру статистичну стійкість, оскільки він показав вищі результати на восьми тестах з п'ятнадцяти, а результати тестів ECIES не виходять за межі 0.9–1.

Висновки

Проведено дослідження криптоалгоритму ECIES та можливість використання математичного апарату циклічного надлишкового коду для підвищення його криптостійкості. Було розроблено метод перевірки публічного ключа на справжність, що унеможливлює проведення успішної атаки малими підгрупами і як результат значно підвищує теоретичну стійкість даного криптоалгоритму.

Проведено статистичне тестування запропонованої модифікації алгоритму та порівняно результати з тестуванням оригінального алгоритму ECIES. Результати статистичного тестування показали високу статистичну надійність запропонованого методу. Також варто зазначити, що модифікований алгоритм

ECIES з вбудованим запропонованим методом перевірки публічного ключа на справжність показав вищі показники на 1–3% е вісьми з п'ятнадцяти тестів.

Крім того було проведеного аналіз швидкодії, який показав, що запропонована модифікація дещо уповільнює роботу алгоритму, в середньому на 2–7 мс для повідомлення розміром 10000 байт.

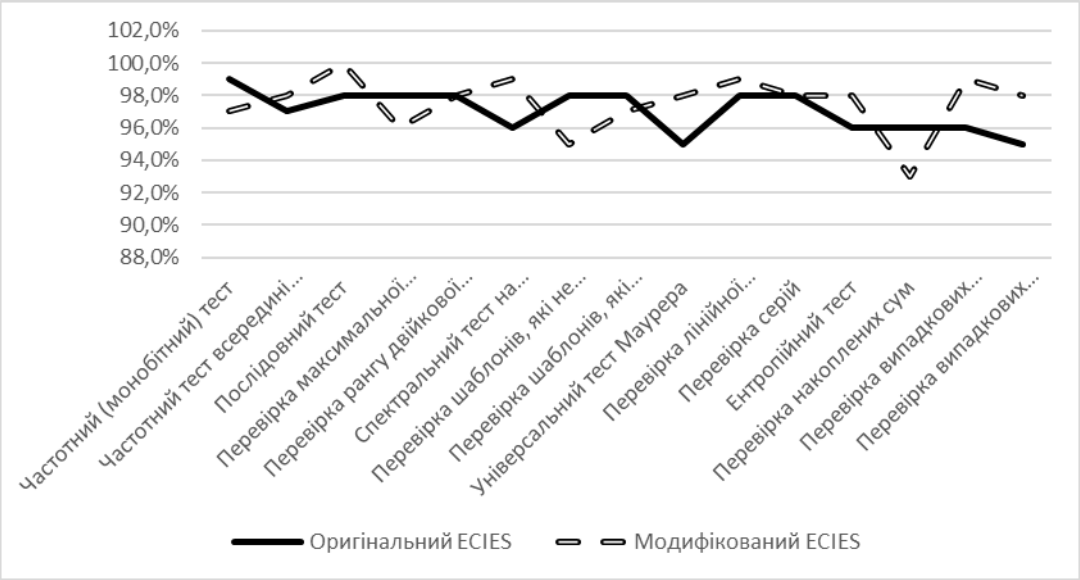


Рис. 6. Порівняння результатів тестування

Література

1. Setiadi I. Elliptic curve cryptography: Algorithms and implementation analysis over coordinate systems / I. Setiadi, A. Kistijantoro, A. Miyaji // 2015 2nd International Conference on Advanced Informatics: Concepts, Theory and Applications (ICAICTA), Chonburi. – 2015. – С. 1–6.

2. Gayoso Martínez V. A Survey of the Elliptic Curve Integrated Encryption Scheme / V. Gayoso Martínez, L. Hernández Encinas, C. Sánchez Ávila // JOURNAL OF COMPUTER SCIENCE AND ENGINEERING. – 2010. – №2. – С. 7–13.

3. Ms. Manali Dubal. Achieving Authentication and Integrity using Elliptic Curve Cryptography Architecture / Ms. Manali Dubal, Ms. Aaradhana Deshmukh // International Journal of Computer Applications (0975 – 8887). – 2014. – №24. – С. 11–15.

4. A comparison of the standardized versions of ECIES / V. Gayoso Martínez, F. Hernández, Á. lvarez, L. Hernández Encinas, C. Sánchez Á vila // 2010 Sixth International Conference on Information Assurance and Security, Atlanta, GA. – 2010. – С. 1–4.

5. Koffka K. The Security of Elliptic Curve Cryptosystems - A Survey / Khan Koffka // Global Journal of Computer Science and Technology. – 2015. – №5. – С. 24–35.

6. Integrated Encryption Scheme // Wikipedia. – 2016. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Integrated_Encryption_Scheme.

7. Krishnaveni V. Analysis of Efficient CRC Implementation Configurations / V. Krishnaveni, S. V.V.N., N.J. Lakshmi // International Journal of Engineering In Advanced Research Science and Technology ISSN: 2278-256. – 2016. – №4. – С. 7880–7888.

8. Pareschi F. On Statistical Tests for Randomness Included in the NIST SP800-22 Test Suite and Based on the Binomial Distribution / F. Pareschi, R. Rovatti, G. Setti // IEEE Transactions on Information Forensics and Security. – 2012. – №2. – С. 491–505.

Рецензія/Peer review : 27.1.2019 р. Надрукована/Printed :16.2.2019 р.
Стаття рецензована редакційною колегією

DOI 10.31891/2307-5732-2019-269-1-162-164
УДК 389:681.2

Н.О. ПУНЧЕНКО
Одеська державна академія технічного регулювання та якості

НАДІЙНІСТЬ РОБОТИ СКЛАДОВИХ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ

На перший погляд може здатися, що для завдання випадкової величини досить перерахувати всі її можливі значення. Насправді це не так: різні випадкові величини іноді можуть мати однакові переліки можливих значень, а відповідні ймовірності цих значень – різні. Тому для повної характеристики мало знати значення випадкової величини, потрібно ще знати, як часто ці значення зустрічаються в досвіді при його повторенні, тобто потрібно ще вказати ймовірності їх появи. Тоді відповідність, що встановлює зв'язок між можливими значеннями випадкової величини і їх можливостями, називається законом розподілу ймовірностей випадкової величини, або просто законом розподілу випадкової величини. Підкоряються будь-яким законам явища, що носять випадковий характер? Так, але ці закони відрізняються від звичних нам фізичних законів. Значення СВ неможливо передбачити навіть за певних умов експерименту, ми можемо лише вказати ймовірності того, що СВ прийме ту чи іншу значення. Зате знаючи розподіл ймовірностей СВ, ми можемо робити висновки про події, в яких беруть участь ці випадкові величини. Правда, ці висновки будуть також носити імовірнісний характер. Точно також, як і для ймовірності випадкової події, для закону розподілу СВ є тільки два шляхи його відшукання. Або ми будуємо схему випадкової події і знаходимо аналітичний вираз (формулу) обчислення ймовірності, або доведеться використовувати експеримент і за частотами спостережень робити якісь припущення (висувати гіпотези) про закон розподілу. Звичайно ж, для кожного з "класичних" розподілів вже давно ця робота пророблена – широко відомими і дуже часто використовуваними в прикладній статистиці є біноміальний і поліноміальний розподіл, геометричне і гіпергеометричне, розподіл Паскаля і Пуассона і багато інших. Отримана щільність розподілу похибок вимірювань параметра є істинною щільністю розподілу випадкових величин змішаної вибірки, а передбачувана щільність і раніше є щільністю нормального розподілу. Запропоновано використання змішаних законів розподілу ймовірності похибки вимірювань складових інформаційної системи для підвищення надійності інформаційних систем.

Ключові слова: розподіл ймовірностей, перетворювач, інформаційні системи.

N.O. PUNCHENKO
Odessa State Academy of Technical Regulation and Quality.

RELIABILITY OF WORKING FOR COMPLEX INFORMATION SYSTEMS

To date, the popularity of such a branch of science as telecommunications and measurement in this industry, has reached a high level, while a fairly large degree of mutual integration of these branches of science. So, each of them requires the creation of decision-making systems. And the tool most often used for this in modern research and scientific projects is the means of measurement, although often they do not allow large-scale labor costs to create sufficiently effective decision-making systems. To collect and process information on the reliability of telecommunications, aimed at improving reliability by refining the calculation methods. In order to obtain information about the reliability of telecommunication facilities, their elements and devices in general, analytical calculations are required for reliability. The classical point of view assumes that the errors of telecommunication measuring instruments obey the normal law, the stability of which gives the right to use this law to describe the operation of systems of dependent random variables. It has been repeatedly shown that using standard methods of telecommunication information processing is a loss of accuracy in the estimation of values, statistical results of measurements errors in the field of telecommunications, which have been achieved experimentally, do not obey the normal law, which reasonably leads to the study of other variants of the laws of distribution of probabilities of errors of telecommunication measurements.

Keywords: probability distribution, converter, information systems.

Вступ. В сучасному інформаційному суспільстві інформаційні технології відіграють важливу стратегічну роль у розвитку кожної галузі. Ця роль швидко зростає за рахунок того, що інформаційні технології:

- активізують і підвищують ефективність використання інформаційних ресурсів;
- відіграють ключову роль в процесах отримання, накопичення, поширення нових знань за трьома напрямками.

1. Інформаційне моделювання, що дозволяє проводити «обчислювальний експеримент» навіть в умовах, які неможливі при натуральному експерименті через небезпеку, складність і дорожнечу.

2. Другий напрям заснований на методах штучного інтелекту, що дозволяє знаходити рішення погано формалізованих задач, завдань з неповною інформацією та нечіткими вихідними даними за аналогією зі створенням метапроцедур, використовуваних людським мозком.

3. Третій напрям базується на методах когнітивної графіки, тобто сукупності прийомів і методів образного уявлення умов завдання, які дозволяють відразу побачити рішення або отримати підказку для його знаходження. Це відкриває можливості пізнання людиною самого себе, принципів функціонування своєї свідомості [1].

Розглядаючи ці напрямки, не можна обійти стороною інформаційні системи, де їх надійність доводиться визначати при розгляді як систем, що складаються з окремих елементів.

Будь-яка технічна система є інтегральною, що складається з підсистем, кожна з яких, в свою чергу, складається з з'єднаних певним чином елементів нижчого рівня.

Цілком очевидно, що, якщо мова йде про параметри надійності системи і про параметри надійності складових елементів, вони не повинні розглядатися незалежно, тобто надійність системи повинна залежати від параметрів надійності складових елементів. Але при розрахунку надійності системи недостатньо знати тільки кількісні співвідношення системи – елементи. У цьому випадку ще принципово важливо враховувати характер функціональної взаємодії елементів і їх призначення. Одним є аналого-цифровій перетворювач.

Швидкодійні аналого-цифрові перетворювачі (АЦП) сигналів є обов'язковими компонентами сучасної комп'ютерної та телекомунікаційної техніки. Завдяки новим можливостям АЦП з'явилася можливість збільшити надійність розроблюваних систем, які оцифровує всю смугу вхідних частот з високою роздільною здатністю, усуваючи необхідність використання безлічі прийомних трактів або дорогих аналогових фільтрів.

Звідси випливає, що ключовими завданнями систем нового покоління є передача набагато більшого обсягу даних і можливість реконфігурування системи при одночасному скороченні споживаної потужності, зменшенні площі, займаної системою на платі, і зниженні вартості. Ці, багато в чому взаємовиключні, вимоги стимулюють пошук нової системної архітектури, що дозволяє вирішувати нові завдання. При вирішенні таких завдань є проблема розробки та виготовлення швидкодійних АЦП з розширеним динамічним діапазоном є однією з найактуальніших проблем техніки, від вирішення якої безпосередньо залежить ефективність інформаційно-вимірювальних систем швидкоплинних технологічних у складі інформаційних комплексів. Незважаючи на ряд вже вирішених питань, при застосуванні швидкодійних АЦП сигналів з покращеними параметрами існує ще багато проблем, які стримують широке використання АЦП в інформаційних системах [2].

Постановка задачі – теоретичний аналіз аналітичного виразу щільності розподілу похибки вибірки складових інформаційної системи.

Виділення невирішених частин – інформаційні системи, до складу яких входять АЦП, потребують високого ступеня автоматизації контролю характеристик як при їх виготовленні, так і в процесі технічного обслуговування. Відсутність ефективних методів розрахунків для визначення характеристик АЦП призводить до значних часових затрат в процесі виготовлення та експлуатації систем.

Метою роботи є забезпечення надійності роботи складових систем шляхом використання методу підвищення точності визначення похибок з урахуванням особливостей розподілу похибок вибірки.

Основна частина. Для вирішення завдань підвищення надійності роботи систем при використанні швідкодійніх АЦП при обробці інформації допускається, що випадкові похибки вимірювань підкоряються нормальному закону. Випадкова змінна – це величина, яка може приймати будь-яке з набору взаємовиключних значень з певною ймовірністю.

Розподіл ймовірності показує ймовірності всіх можливих значень випадкової змінної. Це теоретичний розподіл, що виражений математично і має середню дисперсію – аналоги середнього і дисперсії в емпіричному розподілі.

Кожний розподіл ймовірності визначається деякими параметрами, параметри служать узагальнюючими величинами (наприклад середнє, дисперсія), що характеризують даний розподіл (їх знання дозволить детально описати розподіл).

За допомогою відповідної статистики можна зробити оцінку цих параметрів у вибірці Залежно від того, чи є випадкова змінна дискретної або безперервної, розподіл ймовірності може бути або дискретним, або безперервним Але в ряді випадках при обробці статистичних даних похибок вимірювань, отриманих в натурних спостереженнях, було виявлено, що вони не підкоряються нормальному закону. Це зумовило пошук альтернативних законів розподілу ймовірностей похибок вимірювань.

Для того щоб отримати щільність розподілу однієї з величин, що входять в систему, потрібно щільність спільного розподілу системи проінтегрувати в нескінченних межах по аргументу, відповідному іншої випадкової величини.

Знаючи закон розподілу системи (заданий у вигляді функції розподілу або щільності розподілу), можна знайти закони розподілу окремих величин, що входять в систему. Природно, виникає питання про зворотні задачі: чи не можна за маргінальними законами розподілу окремих величин, що входять в систему, відновити закон розподілу системи? Виявляється, що в загальному випадку цього зробити не можна, так як невідома залежність між випадковими компонентами. Ця залежність може бути охарактеризована за допомогою умовних законів розподілу.

При розгляді деяких моделей формування законів розподілу випадкових похибок вимірювань параметрів, починаючи з нормального розподілу.

Нормальний закон розподілу, який також називають законом Гаусса, грає виключно важливу роль в теорії ймовірності, він найбільш часто зустрічається на практиці. Головна особливість цього закону полягає в тому, що він є граничним законом, до якого наближаються інші закони розподілу за деяких типових умов.

Щільність нормального закону розподілу:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} exp - \frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}$$

де m і σ – відповідно математичне очікування і середньоквадратичне відхилення.

У теорії ймовірностей доведено, що сума великого числа незалежних випадкових величин, підпорядкованих яким завгодно законам розподілу, наближено підпорядковується нормальному закону, і це виконується тим точніше, чим більша кількість випадкових величин підсумовується. Так, похибки вимірювання параметрів можуть бути представлені як сума, вельми велике число, порівняно малих доданків – елементарних похибок, кожна з яких викликана дією окремої причини, що не залежить від інших.

Яким би законам розподілу не були підпорядковані окремі елементарні похибки, особливості цих розподілів в сумі великого числа доданків нівелюються, і сума виявляється підпорядкована закону, близькому до нормального [3] .

Основне обмеження, що накладається на підсумовувані похибки, полягає в тому, щоб вони грали в загальній сумі відносно малу роль.

У багатьох випадках статистичні дані похибок вимірювань, отримані в натурних спостереженнях, не підкоряються нормальному закону, в силу чого використовувати модель змішаного закону розподілу

ймовірностей похибок вимірювань.

Підставою для її застосування є дві такі передумови.

1. Похибки вимірювань при незмінних умовах спостережень мають нормальний розподіл з нульовим математичним очікуванням.

2. Варіації умов спостереження ведуть до випадкового зміни відповідно математичне очікування і середньоквадратичне відхилення σ нормального розподілу. Причому σ, як випадкова величина, має щільність розподілу φ (σ), яка повинна задовольняти умовами:

$$\lim_{\sigma\to 0} \varphi(\sigma) = 0, \ \lim_{\sigma\to\infty} \varphi(\sigma) = 0 \text{ и } \sigma > 0.$$

У цьому випадку щільність змішаного розподілу $f(\xi)$ є щільністю розподілу похибок вимірювань і для центрованої похибки має вигляд:

$$f(\xi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^\infty \frac{\varphi^{\sigma}}{\sigma} exp\left[-\frac{\xi^2}{2\sigma^2}\right] d\sigma \quad (1)$$

Очевидно, що можливість отримання щільності змішаного розподілу $f(\xi)$ в явному вигляді і її основні закономірності визначаються щільністю розподілу в явному вигляді та її основні закономірності визначаються щільністю розподілу φ(σ). В роботі, використовуючи модельні гіпотези, запропоновано в якості φ (σ) вибрати два закони розподілу з густиною $\varphi_1(\sigma)$ и $\varphi_2(\sigma)$, які дозволяють получити змішані щільності в явному вигляді, причому:

$$\varphi_{1(\sigma)} = \frac{\sqrt{\alpha}}{\sqrt{\pi}} \frac{1}{2} exp\left(-\frac{\alpha}{\sigma^2}\right) \qquad \varphi_{2(x)} = 2_{\alpha} \frac{1}{\sigma^3} exp\left(-\frac{\alpha}{\sigma^2}\right)$$

Підставляючи дані щільності в вираз (1), після інтегрування отримаємо базові щільності змішаного розподілу відповідно першого $f_{b1}(x)$ (закон розподілу ймовірностей Коші, який має недоліки: відсутність дисперсії і центральних моментів вищого порядку [3]),

$$f_{b1(x)} = \frac{\sqrt{\alpha}}{\sqrt{2\pi}} \frac{1}{\left(\frac{x^2}{2} + \alpha\right)} \qquad f_{b2(x)} = \frac{\alpha}{2\sqrt{2}} \frac{1}{\left(\frac{x^2}{2} + \alpha\right)^{\frac{3}{2}}}$$

Диференціюючи два отриманих рівняння за параметром α, можна отримати безліч щільності змішаного закону розподілу ймовірностей похибок, що виражаються в явному вигляді:

$$f_1(x) = \frac{2^n \alpha^{n-\frac{1}{2}} \sqrt{\pi}}{\sqrt{2\pi}\, 2 \cdot 4 \cdots (2n-1)} \frac{1}{\left(\frac{x^2}{2} + \alpha\right)^{n+1}} \quad (2)$$

$$f_2(x) = \frac{1 \cdot 3 \cdot 5 \cdots (2n+1)\alpha^{n+1}}{\sqrt{2}\, 2^{n+1}\, n!} \frac{1}{\left(\frac{x^2}{2} + \alpha\right)^{n+1\frac{3}{2}}} \quad (3)$$

де α – масштабний параметр;

n– істотний параметр.

Вираз (2) є щільністю розподілу ймовірностей змішаного закону.

Вираз (3) змішаного закону другого типу, для яких характерна наявність "важких хвостів", причому з ростом істотного параметра змішаний закон розподілу наближається до нормального закону.

Висновки. Аналіз законів розподілу ймовірностей показав недоліки змішаних законів розподілу є те, що вони не належать ні до стійких, ні до безмежно-ділених законам і, тому, не можуть бути використані в разі залежних похибок вимірювань.

Запропоновано використовувати змішані закони розподілу ймовірностей для випадкових похибок для складових інформаційних систем в галузі телекомунікації для більш надійної роботи інформаційних систем.

Література

1. Інформаційні технології: сучасний стан та перспективи : монографія / Г.В. Альошин, О.О. Бесонов, Н.О. Пунченко та ін. ; за заг. ред. В.С. Пономаренка. – Харків : ТОВ «ДІСА ПЛЮС», 2018. – 462 с.
2. Пунченко Н. О. Швидкодійний аналого-цифровий перетворювач з розширеним динамічним діапазоном / Г.Г. Бортник, Н.О. Пунченко, О.Г. Бортник // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2015. – № 3. – С. 99–104.
3. Пунченко Н. О. Вплив законів розподілу ймовірностей на вимірювання в галузі телекомунікацій / Н.О. Пунченко// VII Міжнародна науково-практична конференція «Фізико-технологічні проблеми передавання, оброблення та зберігання інформації в інфокомунікаційних системах», 8–10 листопада 2018 року м. Чернівці. – С. 47.

References

1. Informatsiini tekhnolohii: suchasnyi stan ta perspektyvy : monohrafiia / H.V. Aloshyn, O.O. Besonov, N.O. Punchenko ta in. ; za zah. red. V.S. Ponomarenka. – Kharkiv : TOV «DISA PLIuS», 2018. – 462 s.
2. Punchenko N. O. Shvydkodiinyi analoho-tsyfrovyi peretvoriuvach z rozshyrenym dynamichnym diapazonom / H.H. Bortnyk, N.O. Punchenko, O.H. Bortnyk // Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh. – 2015. – № 3. – S. 99–104.
3. Punchenko N. O. Vplyv zakoniv rozpodilu ymovirnostei na vymiriuvannia v haluzi telekomunikatsii / N.O. Punchenko// VII Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia «Fizyko-tekhnolohichni problemy peredavannia, obroblennia ta zberihannia informatsii v infokomunikatsiinykh systemakh», 8–10 lystopada 2018 roku m. Chernivtsi. – S. 47.

Рецензія/Peer review : 22.1.2019 р. Надрукована/Printed :16.2.2019 р.
Рецензент: д.т.н., доц. Полікаровських О.І.

DOI 10.31891/2307-5732-2019-269-1-165-171
УДК 621.395: 621.372

Т.М. МАНСУРОВ
Азербайджанский технический университет, г. Баку
Р.А. ГАНИФАЕВ
Национальная академия авиации, г. Баку

АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ ОЦЕНОК СИСТЕМЫ FBM/D/1 ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ КАЧЕСТВА ОБСЛУЖИВАНИЯ МУЛЬТИСЕРВИСНОЙ СЕТИ

В работе указано, что конвергенция телекоммуникационных сетей связана с применением новых технологий и расширением спектра оказываемых услуг, которая приводит к существенным изменениям характеристик обслуживаемого трафика. В свою очередь, они влияют на пропускную способность этой сети. С целью решения задачи оценки максимальной интенсивности нагрузки, обслуживаемой мультисервисной сетью с заданными параметрами качества, разработана имитационная модель одноканальной системы массового обслуживания самоподобного трафика с разными законами распределения длительности обслуживания пакетов, проведено статистическое моделирование среднего количества требований в системе, проанализированы их результаты и построены зависимости средней длины очереди для разных моделей систем массового обслуживания при определенных значениях коэффициента Херста. Представленные оценки можно использовать в научных исследованиях для решения задачи качества обслуживания мультисервисной сети, но как показано аналитическим исследованием, что при значении коэффициента Херста H=0,5 из них получается известный результат для системы типа M/M/1. Оценки Норроса показывают степень влияния величины коэффициента Херста на параметры качества обслуживания. Однако результат Норроса, полученный в предположении постоянной длительности обслуживания потока вызовов, дают оценки параметров качества обслуживания, характерные для экспоненциального закона распределения длительности обслуживания, а не регулярного. Работа представляет интерес для широкого круга специалистов, занимающихся анализами точности оценки системы fBM/D/1 для решения задачи качества обслуживания мультисервисной сети при различных законах распределения длительности обслуживания пакетов.

Ключевые слова: *качества обслуживания, самоподобный трафик, имитационное моделирование, параметр Херста, система массового обслуживания, мультисервисная сеть.*

T.M. MANSUROV
Azerbaijan Technical University, Baku
R.A. GANIFAYEV
National Academy of Aircraft, Baku

THE ANALYSIS OF ACCURACY OF ESTIMATES OF FBM/D/1 SYSTEM FOR THE SOLUTION OF THE PROBLEM OF QUALITY OF SERVICE OF MULTISERVICE NETWORK

In work it is specified that convergence of telecommunication networks it is connected with use of new technologies and expansion of a range of the rendered services which leads to significant changes of characteristics of the served traffic. In turn, they influence the capacity of this network. For the purpose of the solution of a problem of assessment of the maximum intensity of the loading served by multiservice network with the set quality parameters the simulation model of a single-channel system of mass service of self-similar traffic with different laws of distribution of duration of service of packages is developed, statistical modeling of average number of requirements in a system is carried out, their results are analysed and dependences of average length of turn for different models of systems of mass service at certain values of coefficient of Hurst are constructed. The presented estimates can be used in scientific research for the solution of a problem of quality of service of multiservice network, but as shown an analytical research that at value of coefficient of Hurst H=0.5 from them the known result for the M/M/1 system turns out. Norros's estimates show extent of influence of size of coefficient of Hurst on parameters of quality of service. However Norros's result received in an assumption of constant duration of service of a stream of calls give the estimates of parameters of quality of service characteristic of the exponential law of distribution of duration of service, but not regular. Work is of interest for a wide range of the experts who are engaged in analyses of accuracy of assessment of fBM/D/1 system for the solution of a problem of quality of service of multiservice network at various laws of distribution of duration of regional narrowing of packages.

Keywords: *qualities of service, self-similar traffic, imitating modeling, Hurst's parameter, system of mass service, multiservice network.*

Введение. Современное состояние развития телекоммуникаций характеризуется процессами конвергенции телекоммуникационных сетей и переходом от сетей с коммутацией каналов к сетям с коммутацией пакетов [1]. Безусловно, что при этом применяются новые технологии и намного расширяется спектр оказываемых услуг, который приводит к существенным изменениям характеристик трафика. Все эти факторы влияют на пропускную способность телекоммуникационных сетей связи [2, 3]. Для решения задачи оценки максимальной интенсивности нагрузки мультисервисной сети, которой возможно обслуживать с заданными параметрами качества, разработана имитационная модель одноканальной системы обслуживания самоподобного трафика с разнообразными законами распределения длительности обслуживания пакетов, выполнено статистическое моделирование и проанализировано их результаты.

Объектом исследований является система fBM/D/1 для решения задачи качества обслуживания мультисервисной сети обслуживания с широким спектром оказываемых услуг и характеристик трафика.

Предметом исследований является исследование и анализ основных закономерностей обеспечения точности оценок системы массового обслуживания для решения задачи качества обслуживания

мультисервисной сети.

Целью работы является разработка имитационной модели одноканальной системы обслуживания самоподобного трафика с разнообразными законами распределения длительности обслуживания пакетов, реализация статистического моделирования, анализ полученных результаты и выдача определенных рекомендаций.

Актуальность работы. Основу расчета телекоммуникационных систем составляет теория телетрафика. Важнейшими понятиями этой теории является нагрузки, пропускная способность и параметры качества обслуживания. Параметры качества обслуживания зависят от допустимой нормы потерь сообщений и емкости самой телекоммуникационной системы (числа каналов или портов). В то же время они зависят и от статистических свойств потока вызовов, поступающего в телекоммуникационную систему. Итак, главная задача теории телетрафика, которая использует методы теории вероятностей, заключается в исследовании параметров качества обслуживания различных систем распределения информации и выявления связи этих параметров со статистическими свойствами трафика сети [4]. Основные известные аналитические зависимости для оценки параметров качества обслуживания, полученные в предположении о пуассоновском характере трафика. Однако реальные потоки вызовов, циркулирующие в современных телекоммуникационных сетях, существенно отличаются от "идеализированной" модели пуассоновских потоков, а именно носят самоподобный характер, и поэтому ряд задач в области методов расчета телекоммуникационных систем остаются открытыми и требуют дальнейшего исследования.

Исследование систем с самоподобным трафиком и детерминированным временем обслуживания. Трафик, передающийся по мультисервисным сетям или сетям с коммутацией пакетов, характеризуется наличием долгосрочных зависимостей в интенсивности нагрузки и существенным отличием статистических свойств потоков пакетов от пуассоновского потока и даже любых других потоков, определяемых одномерной функцией распределения вероятности промежутка времени между событиями поступления пакетов. Более адекватной моделью потоков в таких сетях являются самоподобные процессы, однако исследование характеристик качества обслуживания системы массового обслуживания (СМО) в этих условиях является очень сложной математической задачей. Например, для одноканальной СМО с бесконечной очередью при постоянной интенсивности обслуживания μ или постоянном времени обслуживания $t_{обсл} = 1/\mu$, где входной поток описывается фрактальным броуновским движением (модель fBM/D/1) и приближенное решение было получено в работе [5], где показано, что количество требований в рассматриваемой системе в любой момент времени может t быть представлено случайной величиной

$$N(t) = \sup_{S \le t}[A(t) - A(s) - \mu(t-s)], \tag{1}$$

где

$$A(t) = \lambda t + \sqrt{a\lambda} \cdot Z(t), \tag{2}$$

Случайный процесс $Z(t)$ является нормализованным фрактальным броуновским движением с параметром Херста, равным H, а положительный коэффициент a является некоторым масштабирующим множителем. Как показал Норрос [5], для случая статистического равновесия, когда $\rho = \dfrac{\lambda}{\mu} < 1$, вероятность того, что количество требований в системе N превысит заданную величину x, может быть представлена как некоторая функция

$$\Pr(N > x) = \Pr\left(\sup_{t>0}\left(Z(t) - \frac{\mu-\lambda}{\sqrt{a\lambda}}t\right) > \frac{x}{\sqrt{a\lambda}}\right) = f\left(\left(\frac{\mu-\lambda}{\sqrt{a\lambda}}\right)^{(1-H)/H} \frac{\mu-\lambda}{\sqrt{a\lambda}}\right). \tag{3}$$

Для случая, когда эта вероятность равна заранее заданной величине $\Pr(N > x) = \varepsilon$, из (3) следует, что

$$\frac{1-\rho}{\rho^{0,5/H}} \cdot \mu^{(H-0,5)/H} x^{(1-H)/H} \cdot \frac{a^{0,5/H}}{f(\varepsilon)} = const, \tag{4}$$

а это значит, что

$$x = \frac{1-\rho^{H/(H-1)}}{\rho^{0,5/(H-1)}}. \tag{5}$$

Следует напомнить, что x найдено из условия (4), если считать константу равной единице. Вероятность, равная единице – это достоверное событие и, следовательно, $x-$это количество требований в системе, которое не может быть превышено, т.е. это верхняя оценка среднего количества требований N в системе fBM/D/1. Поскольку из формулы Литтла следует, что $T = N/\lambda$, то среднее время пребывания требования в системе в единицах времени длительности обслуживания определяется формулой:

$$T = \frac{1-\rho^{H/(H-1)}}{\rho^{0,5/(H-1)}} \frac{1}{\rho} = \frac{1-\rho^{H/(H-1)}}{\rho^{(H-0,5)/(H-1)}}. \tag{6}$$

Исходя из того, что для любой одноканальной системы средняя длина очереди $Q = N - \rho$, то с

учетом (5) для системы fBM/D/1получаем:

$$Q = \frac{1-\rho^{H/(H-1)}}{\rho^{0,5/(H-1)}} - \rho. \quad (7)$$

По мнению некоторых исследователей, результат Норроса [5] в виде выражений (5), (6) и (7) может быть интерпретирован как аналитическое решение для системы fBM/D/1. Однако при анализе этого решения нетрудно заметить, что при задании коэффициента Херста $H = 0,5$ (несамоподобный процесс) имеем:

$$N = \frac{1-\rho^{0,5/(0,5-1)}}{\rho^{0,5/(0,5-1)}} = \frac{\rho}{1-\rho}, \quad (8)$$

$$T = \frac{1-\rho^{0,5/(0,5-1)}}{\rho^{(0,5-0,5/(0,5-1)}} = \frac{1}{1-\rho}, \quad (9)$$

$$Q = \frac{1-\rho^{0,5/(0,5-1)}}{\rho^{0,5/(0,5-1)}} = \frac{\rho^2}{1-\rho}, \quad (10)$$

т.е. получается известный результат для среднего количества требований, средней длительности пребывания и средней длины очереди в системе типа M/M/1. Это весьма нелогичный результат с учетом того, что изначально исследовалась СМО с детерминированным временем обслуживания – модель fBM/D/1. При изменении коэффициента Херста от значения $H = 1$ (максимальное значение) до $H = 0,5$ (минимальное значение), несомненно, видоизменяется поток требований и соответствующая функция распределения вероятности промежутка времени между требованиями, но не изменяется функция распределения длительности обслуживания. Видно, что при $H = 0,5$ поток теряет свойства самоподобности, но тогда в этом случае результаты Норроса должны коррелироваться с результатами не для модели M/M/1, а, по крайней мере, для модели G/D/1 или в частном случае для модели M/D/1, для которой

$$N = \rho + \frac{\rho^2}{2(1-\rho)}, \quad (11)$$

$$T = 1 + \frac{\rho}{2(1-\rho)}, \quad (12)$$

$$Q = \frac{\rho^2}{2(1-\rho)}. \quad (13)$$

Алгоритм имитационного моделирования процесса обслуживания самоподобного трафика. Установить степень точности результата Норроса можно при помощи имитационного моделирования. Программа имитационного моделирования системы обслуживания содержит подпрограммы реализации двух случайных величин: согласно функции распределения промежутков времени между требованиями $A(t)$ и функции распределения продолжительности обслуживания $B(t)$. Процесс прибытия требований в систему моделируется как рекуррентный (момент прибытия очередного требования получается добавлением случайного интервала $A(t)$ к предыдущему), моменты освобождения серверов – добавлением к текущему моменту случайной длительности обслуживания $B(t)$. Данные интервалы формируются датчиками псевдослучайных чисел, настроенными на требуемые законы распределения. Как доказано в работе [6] для генерации входящего самоподобного трафика в качестве функции $A(t)$ можно использовать распределение Парето, получаемое путем перехода от равномерного распределения методом обратной функции:

$$Z_i = \frac{b}{\sqrt[a]{U_i}}, \quad (14)$$

где $Z_i - i-$й интервал между событиями, $U -$ случайное число, равномерно распределенное на интервале [0,1].

Рассмотрим построение логической схемы алгоритма построения имитационной модели однолинейной СМО с ожиданием и обслуживанием заявок в порядке поступления. Будем считать, что работа СМО прекращается, если обслужено n заявок. Начальное состояние соответствует отсутствию заявок в системе и когда определяемой характеристикой выступает вероятность того, что поступающая заявка застанет СМО в состоянии простоя. Потоки событий ординарные, заданы функции распределения промежутков между соседними событиями каждого из потоков.

На рис. 1 показана блок-схема разработанного алгоритма имитационной модели однолинейной СМО с ожиданием и обслуживанием заявок в порядке поступления.

На рис. 1 для построения схемы моделирования такой СМО используются следующие операторы:

1 – оператор начальной установки $i-$значения счетчика числа реализаций и $k-$значения счетчика числа требований, поступление которых совпало с простоем СМО (по всем реализациям);

2 – оператор установки начального значения $j-$номера проводимой заявки; $t_{j-1}-$значения момента

прихода в СМО $(j-1)-$й заявки и $\theta_{j-1}-$значения момента выхода $(j-1)-$й заявки (для каждой реализации);

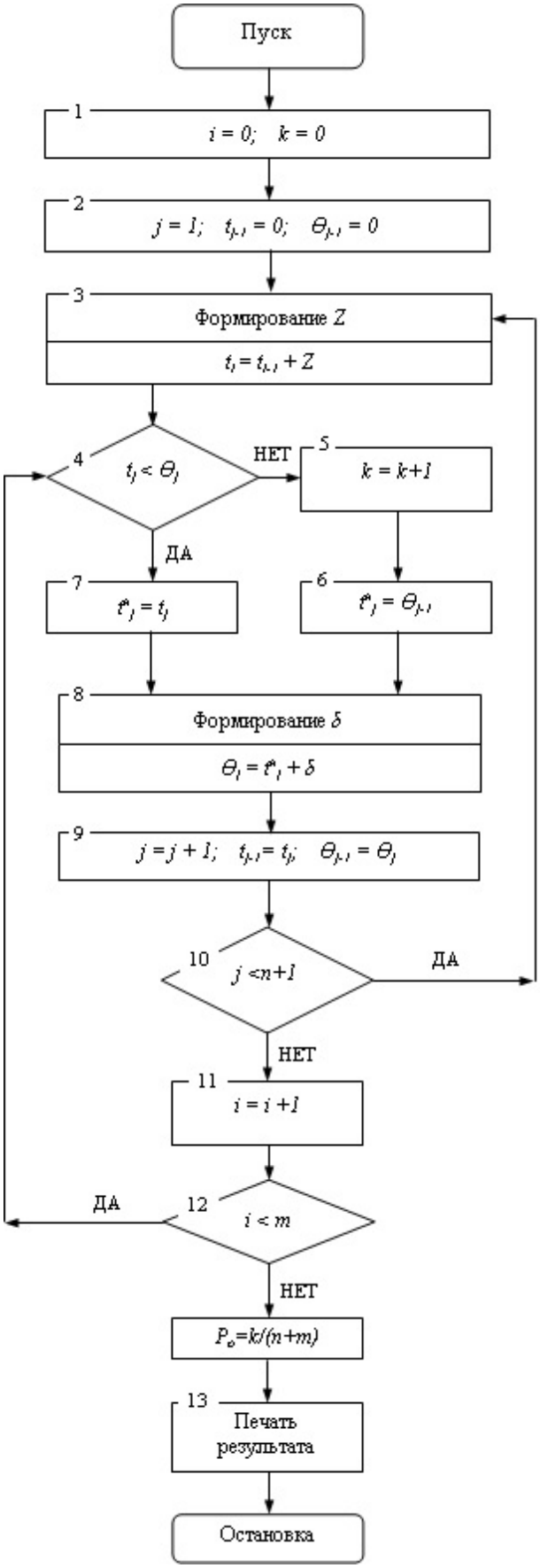


Рис. 1. Блок-схема разработанного алгоритма имитационной модели

3– оператор формирования величины t_j, причем Z – величина промежутка времени между моментами поступления $(j-1)$ и *j*-й заявки, совокупность этих величин распределена по закону $A(t)$;

4 – логический оператор, выясняющий состояние СМО (простоя или работы) в момент прихода *j*-й заявки;

5 – оператор счета числа поступлений требований в СМО, при которых система простаивала (по всем реализациям);

6, 7 – операторы формирования значения t_j^n – момента начала обслуживания *j*-й заявки;

8 – оператор формирования θ_j, причем τ_j – длительность обслуживания *j*-й заявки, совокупность этих величин распределена по закону $B(t)$;

9 – оператор переиндексации *j* номера проводимой заявки;

10 – логический оператор, служащий для фиксации окончания обслуживания *n*-й заявки (для каждой реализации);

11 – счетчик числа реализаций;

12 – логический оператор, выясняющий момент окончания *m*-й реализации;

13 – оператор печати результата моделирования.

Из блок-схемы рис. 1 видно, что все операторы делятся на два вида:

1. Операторы, предназначенные непосредственно для моделирования процессов в СМО (1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12).
2. Операторы, предназначенные для фиксации, обработки и выдачи определяемых характеристик (5, 13).

Совокупность операторов первого вида определяется структурой моделируемой СМО, дисциплиной прохождения требований и т. д. [6, 7].

Результаты имитационного моделирования СМО типа fBM/D/1. Оценки Норроса показывают степень влияния величины коэффициента H на параметры качества обслуживания N, T и Q. Однако результат Норроса, полученный в предположении постоянной длительности обслуживания, вызывает сомнение, поскольку при $H = 0{,}5$ выражения (8), (9) и (10) дают оценки параметров качества обслуживания, характерные для экспоненциального закона распределения длительности обслуживания, а не регулярного. Установить степень точности результата Норроса можно при помощи имитационного моделирования. Для этого использована модель, представленная в работе [5]. При имитационном моделировании достаточно оценить только один из параметров, например N, поскольку параметры Q и T связаны с N известными функциональными зависимостями, применениями формула Литтла. Результаты имитационного моделирования СМО типа fBM/D/1 при $H = 0{,}7$ приведены на рис. 2 и показаны линией, обозначаемой знаком «+».

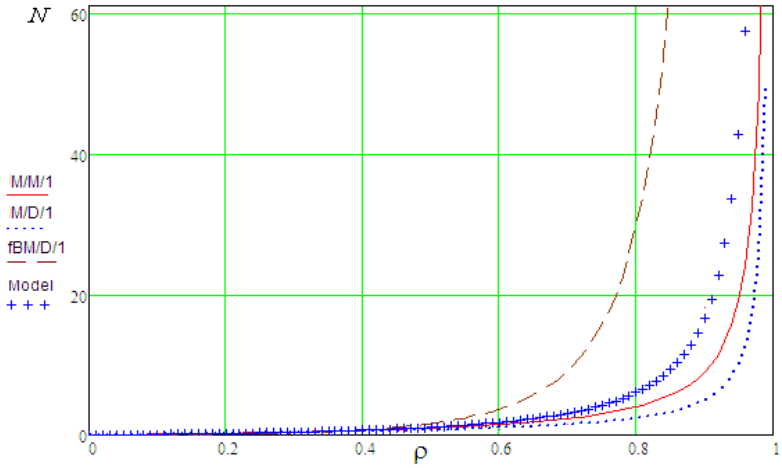


Рис. 2. Результат моделирования среднего количества требований в системе N для модели fBM/D/1 при $H = 0{,}7$

Результаты моделирования подтверждают выводы о том, что при наличии свойств самоподобия во входящем потоке требований с ростом интенсивности нагрузки ρ ухудшаются характеристики качества обслуживания, но не настолько, как предполагается по методу Норроса. Расхождение результатов моделирования и оценок, получаемых по (8), (9) и (10) составляет сотни процентов [8]. Очевидно, что оценка Норроса значительно завышена, что требует нахождения более точного решения. Несмотря на то, что в [8] предложена несколько иная оценка средней длины очереди в одноканальной системе с

самоподобным входящим потоком и детерминированным временем обслуживания, но она все же базируется на результате (8). Для некоторого повышения точности оценки за основу расчета Q взята не естественная функциональная зависимость $Q = N - \rho$, чтобы получить (10), а предложено рассчитывать $Q = N\rho$, что дало:

$$Q = \rho \frac{\rho^{1/2(1-H)}}{1-\rho^{H/(1-H)}}. \qquad (15)$$

Следует заметить, что при $H = 0{,}5$ здесь также получается известный результат (7) для средней длины очереди в модели M/M/1. При иных значениях H оценки средней длины очереди (15) несколько ниже оценок (10) и ближе к результатам моделирования, что продемонстрировано на рис. 3 зависимостью в виде штрих-пунктирной линии.

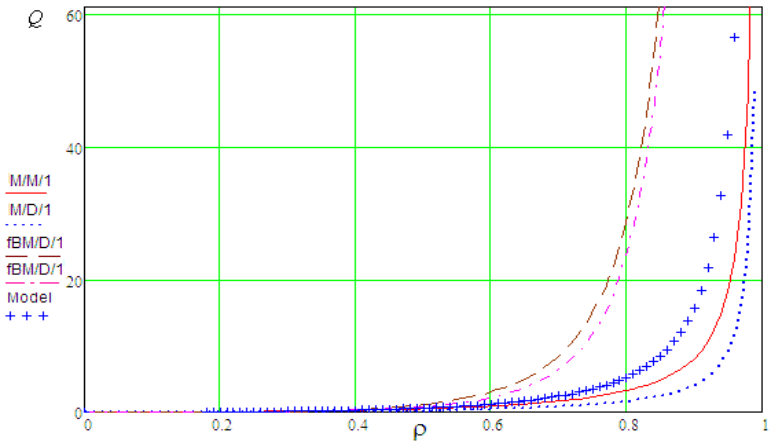


Рис. 3. Зависимость средней длины очереди Q для моделей M/M/1, M/D/1 и fBM/D/1 при $H = 0{,}7$

По результатам видно, что получаемые значения Q методами (10) и (15) отличаются между собой незначительно, но обе оценки существенно отличаются от результатов моделирования[5,9]. На графике можно видеть, что с ростом интенсивности нагрузки ρ увеличивается средняя длина очереди Q, но еще более существенно она увеличивается при наличии свойств самоподобия во входящем потоке требований. Несомненно, характеристика качества обслуживания Q ухудшается, но не настолько, как предполагается по методу Норроса. Приведенный анализ показал, что оценка Норроса является достаточно грубой оценкой с погрешностью в сотни процентов. Отсюда следует, что все результаты, полученные на основе оценок Норроса, будут столь же неточны. Например, это касается результатов, полученных в [9], где на базе формулы Норроса (15) и известных соотношений между параметрами QoS даются оценки среднего размера буфера, среднего времени нахождения требования в буфере, среднего времени нахождения запроса в системе, среднего времени задержки запроса в сети передачи данных.

Заключение. Представленные оценки Норроса для системы fBM/D/1 можно использовать в научных исследованиях для решения задачи качества обслуживания мультисервисной сети, но как показано аналитическим исследованием, что при значении коэффициента Херста $H = 0{,}5$ из них получается известный результат для системы типа M/M/1 [10]. Оценки Норроса показывают степень влияния величины коэффициента H на параметры качества обслуживания N, T и Q. Однако результат Норроса, полученный в предположении постоянной длительности обслуживания потока вызовов, вызывает сомнение, поскольку при $H = 0{,}5$ выражения (8), (9) и (10) дают оценки параметров качества обслуживания, характерные для экспоненциального закона распределения длительности обслуживания, а не регулярного.

Литература

1. Величко В.В. Телекоммуникационные системы и сети. Том 3. Мультисервисные сети / В.В. Величко, Е.А. Субботин, В.П. Шувалов, А.Ф. Ярославцев. – М. : Горячая линия – Телеком, 2005. – 592 с.

2. Ганифаев Р.А. Исследование параметров мультисервисного узла доступа сети следующего поколения / Р.А. Ганифаев // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2007. – № 2. – С. 79–86.

3. Ложковский А.Г. Методы расчета качества обслуживания в мультисервисных сетях связи / А.Г. Ложковский // The 2-nd International Conference «Telecommunication, Electronics and Informatics», Chishinau. – 2008 – С. 117–126.

4. Крылов В.В. Теория телетрафика и её приложения / В.В. Крылов, С.С. Самохвалов. – СПб : БХВ-Петербург, 2005. – 288 с. : ил.

5. Norros Ilkka. A storage model with self-similar input. – Queuing Systems, 1994. – Vol. 16.

6. Ганифаев Р.А. Моделирование обслуживания самоподобного трафика в системе массового обслуживания / Р.А. Ганифаев // Національна академія наук України. Інститут проблем моделювання в енергетиці. – Київ, 2010. – Випуск 56.

7. Ганифаев Р.А. Имитационное моделирование времени ожидания в сетях с коммутацией пакетов / Р.А. Ганифаев, М.А. Мамедов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2007. – № 1/2(25). – С. 116–119.

8. Ложковский А.Г. Оценка параметров качества обслуживания самоподобного трафика энтропийным методом / А.Г. Ложковский, Р.А. Ганифаев // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2008. – № 1. – С. 57–62.

9. Агеев Д.В. Сравнительный анализ методик выбора пропускных способностей каналов связи при самоподобных потоках в сети / Д.В. Агеев, Самер Махмуд // Зв'язок. – 2007. – № 3. – С. 15–22.

10. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания / Л. Клейнрок ; пер. с англ. – М. : Машиностроение, 1979. – 432 с., ил.

References

1. Velichko V.V. Telekommunikacionnye sistemy i seti. Tom 3. Mul'tiservisnye seti / V.V. Velichko, E.A. Subbotin, V.P. Shuvalov, A.F. Jaroslavcev. – M. : Gorjachaja linija – Telekom, 2005. – 592 s.

2. Ganifaev R.A. Issledovanie parametrov mul'tiservisnogo uzla dostupa seti sledujushhego pokolenija / R.A. Ganifaev // Naukovi praci ONAZ im. O.S. Popova. – 2007. – № 2. – S. 79–86.

3. Lozhkovskij A.G. Metody rascheta kachestva obsluzhivanija v mul'tiservisnyh setjah svjazi / A.G. Lozhkov-skij // The 2-nd International Conference «Telecommunication, Electronics and Informatics», Chishinau. – 2008 – S. 117–126.

4. Krylov V.V. Teorija teletrafika i ejo prilozhenija / V.V. Krylov, S.S. Samohvalov. – SPb : BHV-Peterburg, 2005. – 288 s. : il.

5. Norros Ilkka. A storage model with self-similar input. – Queuing Systems, 1994. – Vol. 16.

6. Ganifaev R.A. Modelirovanie obsluzhivanija samopodobnogo trafika v sisteme massovogo obsluzhivanija / R.A. Ganifaev // Nacional'na akademija nauk Ukraini. Інститут problem modeljuvannja v energetici. – Kiiv, 2010. – Vipusk 56.

7. Ganifaev R.A. Imitacionnoe modelirovanie vremeni ozhidanija v setjah s kommutaciej paketov / R.A. Ga-nifaev, M.A. Mamedov // Vostochno-Evropejskij zhurnal peredovyh tehnologij. – 2007. – № 1/2(25). – S. 116–119.

8. Lozhkovskij A.G. Ocenka parametrov kachestva obsluzhivanija samopo¬dobnogo trafika jentropijnym meto-dom / A.G. Lozhkovskij, R.A. Gani¬faev // Naukovi praci ONAZ im. O.S. Popova. – 2008. – № 1. – S. 57–62.

9. Ageev D.V. Sravnitel'nyj analiz metodik vybora propusknyh sposobnostej kanalov svjazi pri samopo-dobnyh potokah v seti / D.V. Ageev, Samer Mahmud // Zv'jazok. – 2007. – № 3. – S. 15–22.

10. Klejnrok L. Teorija massovogo obsluzhivanija / L. Klejnrok ; per. s angl. – M. : Mashinostroenie, 1979. – 432 s., il.

Рецензія/Peer review : 5.1.2019 р. Надрукована/Printed :16.2.2019 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Ибрагимов Б.Г.

DOI 10.31891/2307-5732-2019-269-1-172-177
УДК 681.327.12

А.Д. ГАФУРОВА, В.В. КОВТУН
Вінницький національний технічний університет

НЕЙРОМЕРЕЖЕВА АДАПТАЦІЯ PLDA ДЛЯ ВИКОРИСТАННЯ У АВТОМАТИЗОВАНІЙ СИСТЕМІ РОЗПІЗНАВАННЯ МОВЦЯ КРИТИЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ

Автори пропонують актуальні системи розпізнавання мовців, де застосовується і-векторне/PLDA моделювання для опису фонограм, синтезують узагальнену PLDA модель із усередненими параметрами по всій базі фонограм без їх сегрегації за рівнем шумів. В результаті такі системи забезпечують прийнятний рівень надійності лише за наявності великої навчальної вибірки як за кількістю, так і за тривалістю фонограм. У роботі автори синтезували окремі PLDA моделі для опису фонограм із детермінованими рівнями відношення сигнал/шум (ВСШ), в результаті чого фактори, які характеризують індивідуальність мовців, зосереджено у найбільш мінливих областях і-векторного простору. Автори запропоновували використовувати нейромережу для прецизійного детектування діапазонів рівнів ВСШ вхідних фонограм із подальшим використанням одержаних даних при синтезі універсальних фонових моделей, які оптимально описують вплив сторонніх акустичних шумів у фонограмах, що дозволяє як підвищити якісні показники роботи автоматизованої системи розпізнавання мовців критичного застосування так і встановлювати факт непридатності для подальшої обробки запропонованої системі в якості вхідних даних фонограми, що також підвищує надійність роботи системи загалом.

Ключові слова: *автоматизована система розпізнавання мовців критичного застосування, і-вектори, нейромережа, суміш PLDA*

A.D. HAFUROVA, V.V. KOVTUN
Vinnytsia National Technical University

NEURAL NETWORK ADAPTATION OF PLDA FOR THE AUTOMATIC SPEAKER RECOGNITION SYSTEM OF CRITICAL USE

Authors offer speaker recognition systems that use i-vector/PLDA modelling to describe phonograms synthesize a generalized PLDA model with averaged parameters throughout the phonogram database without their noise segregation. As a result, such systems provide an acceptable level of reliability only in the presence of a large training sample, both in quantity and duration of phonograms. The authors synthesized individual PLDA models for describing phonograms with deterministic levels of signal-to-noise ratio (SNR), resulting in factors that characterize the individuality of speakers, concentrated in the most volatile regions of the i-vector space. Authors proposed to use a neural network for precise detection of ranges of SNR levels of incoming phonograms with subsequent use of the data obtained in the synthesis of universal background models that optimally describe the influence of extraneous acoustic noises in phonograms, which allows not only to improve the performance of the automatic speaker recognition system of critical use, but also to establish the fact of unfitness for further processing of the input phonogram, which also increases the reliability of the system at all. The authors proposed an improved method for the adaptation of mixtures of PLDA-models to the presence of speech signals in phonograms, on which ACCRM performs voice recognition, dynamic level of VSS. The method based on the use of GNM for training UFM, namely, the GNM in the learning process changes the weight of interneuronal bonds to optimally determine the ranges of changes in the level of BCS in the i-vectors extracted from educational phonograms.

Keywords: *automatic speaker recognition system of critical use, i-vectors, neural network, PLDA mixture.*

Вступ

При створенні автоматизованої системи розпізнавання мовців критичного використання (АСРМКЗ) першочергову увагу слід приділити оцінюванню надійності функціонування системи в умовах шумного навколишнього акустичного середовища. Зазначимо, що в першому наближенні ці шуми можна розділити на детерміновані (спричинені умовами каналу передавання акустичної інформації, наприклад) та стохастичні (спричинені втручанням непередбачуваних факторів, що може призвести до виникнення критичної ситуації). Відзначимо, що компенсувати вплив шумів першого типу у сучасних системах розпізнавання мовців до певного рівня вдіється як застосуванням методів цифрової обробки сигналів так і на рівні екстрагування інформативних для розпізнавання особи мовця факторів. Шуми другого типу за своєю природою вимагають створення імовірнісного математичного апарату, що, враховуючи комплексність задачі розпізнавання мовця, є нетривіальною задачею, розв'язання якої починається із вибору способу опису мовного сигналу у просторі ознак. У сучасних класичних системах розпізнавання мовця в якості комплексної інформативної ознаки (фактора) активно використовують *і*-вектори [1–3], екстраговані з фонограм із записами мовних сигналів різної тривалості. У просторі загальної мінливості *і*-вектори представляють апостеріорними середніми значеннями прихованих змінних факторного аналізатора [1]. Відзначимо, що *і*-вектор є комплексним способом опису мовного сигналу і виділення в ньому актуальної для розпізнавання мовця інформації є окремою задачею, яку зараз найчастіше вирішують методом імовірнісного лінійного дискримінантного аналізу (Probabilistic Linear Discriminative Analysis, PLDA) [4], який аналізуючи множини і-векторів формує їх індивідуальне представлення відповідно до класів мовців у факторному просторі. Останнім часом для сегрегації залежної від особи мовця інформації з і-векторів застосовують, зокрема, глибокі нейромережі (Deep neural networks, DNN) [5–7]. Наприклад, у дослідженні [7] при створенні системи розпізнавання мовця універсальну фонову модель (Universal background model,

UBM), яка є незалежною від особи мовця моделлю гаусових сумішей (Gaussian mixture model, GMM), замінили фонетично навченою ГНМ для обчислення апостеріорних імовірностей фреймів фонограм і емпірично довели більшу ефективність такої модифікації у порівнянні із стандартним УФМ/*i*-вектор-підходом. ГНМ/*i*-вектор-підхід дозволив якісно класифікувати фрейми із мовним сигналом за категоріями сенонів, що покращило показники якості розпізнавання мовців за визначеною парольною фразою.

У роботі [8, 9], на основі спостереження, що *i*-вектори, отримані з фонограм, які мали подібні рівні відношення сигнал/шум (ВСШ), схильні групуватися у *i*-векторному просторі, запропоновано метод представлення ВСШ-залежних просторів мовців у ВСШ-незалежній PLDA, а у роботах [10, 11] апостеріорні імовірності значень індикаторних змінних зв'язано із рівня ВСШ фонограм. Узагальнюючи ці підходи можна зробити висновок, що рівень ВСШ є важливим критерієм, ведення якого у створювану PLDA-модель дозволяє застосовувати її для розпізнавання мовця взагалі і робити це за фонограмами у яких мовний сигнал супроводжується шумами навколишнього середовищі зокрема.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

При реалізації АСРМКЗ актуальною є задача створення стійкого до присутнього у *i*-векторі шуму класифікатора. У роботі [1] автори запропонували навчати множини PLDA-моделей на основі груп факторів, екстрагованих із фонограм із визначеними рівнями ВСШ, із подальшою класифікацією мовців на основі значень апостеріорних імовірностей належності аналізованих факторів до однієї з навчених PLDA-моделей. Емпіричні дослідження виявили залежність якісних показників роботи АСРМКЗ від точності детектування рівнів ВСШ вхідних фонограм, але використовуючи класичні підходи покращити якісні характеристики цього процесу виявилося неможливим. Отже, автори пропонують дослідити можливість інтеграції штучної нейромережі глибокого навчання у АСРМКЗ для автоматизації процесу детектування рівнів ВСШ у фонограмах у процесі навчання нейромережі.

СТВОРЕННЯ PLDA-СУМІШІ ІЗ ІНТЕГРОВАНОЮ ЗАЛЕЖНОЮ ВІД РІВНЯ ВСШ ГНМ

Враховуючи позитивний досвід застосування ГНМ/*i*-вектор-апарату для GMM-навчання, ми пропонуємо удосконалений метод навчання PLDA-суміші за допомогою ГНМ для розпізнавання мовців за фонограмами із динамічним рівнем ВСШ. Передбачається, що апостеріорні імовірності рівня ВСШ, отримані з *i*-вектора, використовуються як індикаторні змінні у функціях правдоподібності суміші PLDA для управління процесом навчання моделі суміші, а апостеріорні рівні ВСШ отримуються від навченої на детектування відповідного рівня ВСШ ГНМ. І, нарешті, *i*-вектори, отримані з фонограм мовців, які розпізнаються, і мовців, на розпізнавання яких навчено систему, та апостеріорні рівні ВСШ, отримані від ГНМ, використовуються для лінійного комбінування маргінальних функцій правдоподібності різних сумішей PLDA. Отримана в результаті суміш, на відміну від залежної від рівня ВСШ суміші PLDA, не залежатиме від фактичного рівня ВСШ тестової та еталонної фонограм, а використовуватиме лише їх апостеріорні імовірності рівня ВСШ.

Процес навчання звичайної PLDA-суміші (незалежної від рівня ВСШ) [12] еквівалентно процедурі самокластеризації *i*-векторів у множину Гаусіан, по одній для кожного з мовців, якого розпізнаватиме система (PLDA-модель і класифікатор). Оскільки в процесі навчання інформація про рівень ВСШ ігнорується, *i*-вектори, отримані із «шумних» та «чистих», відповідно до присутності у записі мовного сигналу сторонніх акустичних шумів, фонограм узагальнюються разом, що розмиває межі кластерів мовців тим більше, чим більше «шумних» фонограм використовувалося при навчанні. Автори припускають, що ГНМ може виковувати функцію вчителя у процесі навчання моделей PLDA-сумішей, тобто управляти процесом кластеризації *i*-векторів у залежні від рівня ВСШ групи фонограм і зробити це прецизійніше відносно рівня ВСШ, порівняно із стандартним ЕМ-алгоритмом. Відповідно, подавши на вхід ГНМ *i*-вектори на виході мережі ми повинні отримати апостеріорні імовірності рівнів ВСШ (ядра активності нейронів вихідного шару визначають присутність відвідного рівня ВСШ у фонограмі, з якої екстраговано вхідний *i*-вектор).

Отже, з кожної фонограми начальної вибірки екстрагується *i*-вектор, множина яких згодом подається на вхід ГНМ. Значення виходів навченої ГНМ (апостеріорні імовірності наявності рівнів ВСШ у фонограмах) потім використовуються як апостеріорні імовірності значень індикаторних змінних моделі PLDA-суміші, що робить кластери мовців у *i*-векторному факторному просторі залежними від рівнів ВСШ. Для вхідного *i*-вектора x_{ij}, екстрагованого з j-ї фонограми i-го мовця, апостеріорна імовірність присутності k-го рівня ВСШ у j-й фонограмі, визначена ГНМ, описується відношенням

$$\gamma_{x_{ij}}\left(y_{ijk}\right) \equiv P\left(y_{ijk}=1 \middle| x_{ij}, \underline{w}\right), \tag{1}$$

де y_{ijk} – індикаторна змінна, яка вказує на компонент суміші, що описує спостереження x_{ij}, а $\underline{w}$ – ваги ГНМ, яка детектує рівні ВСШ. Розповсюдимо (1) на суміш K PLDA-моделей:

$$p\left(x_{ij}\right) = \sum_{k=1}^{K} \int P\left(y_{ijk}=1 \middle| x_{ij}, \underline{w}\right) p\left(x_{ij} \middle| z, y_{ijk}=1, \theta_k\right) p(z) dz =$$

$$= \sum_{k=1}^{K} \gamma_{x_{ij}}\left(y_{ijk}\right) N\left(x_{ij} \middle| m_k, V_k V_k^T + \Sigma_k\right), \tag{2}$$

де z – фактор мовця, який зв'язаний із всіма компонентами суміші, m_k, V_k і Σ_k описують математичне сподівання, підпростір мовців та коваріаційну матрицю k-ї групи за рівнем ВСШ відповідно. Параметри моделі у відношенні (2) згорнуто до виду $\theta = \{m_k, V_k, \Sigma_k\}_{k=1}^{K}$. Варіативність індивідуальних ознак мовців описується добутком $V_k V_k^T$, а варіативність фонограм коефіцієнтом Σ_k, $k = 1,...,K$.

Позначимо $Y = \{y_{ijk}\}_{k=1}^{K}$ множину прихованих індикаторних змінних, за значенням яких вибиратимемо один з K факторних аналізаторів спираючись на рівень ВСШ вхідної фонограми. Зокрема, $y_{ijk} = 1$ якщо k- та PLDA-модель вказує на x_{ij} та $y_{ijk} = 0$ у іншому випадку. Маючи набір D-розмірних нормованих за довжиною i-векторів $X = \{x_{ij}, i = \overline{1,S}, j = \overline{1,H_i}\}$, параметри θ можна отримати з вхідних даних набору оцінюванням методом максимальної правдоподібності. Спираючись на початкове значення θ, ми прагнемо віднайти нову оцінку θ', яка максимізуватиме цільову функцію

$$Q(\theta',\theta) = E_{Y,Z}\{\ln p(X,Y,Z|\theta')|X,\theta\} = E_{Y,Z}\left\{\sum_{ijk} y_{ijk} \ln\left(p(y_{ijk}=1|\theta')p(x_{ij}|z_i,\theta')p(z_i)\right)|X,\theta\right\}. \quad (3)$$

Аналітичне викладення ЕМ-алгоритму, якій максимізуватиме (3), аналогічне отриманим авторами у відношеннях (8) і (13) у [1], за умови заміни апріорних сподівань значень індикаторних змінних y_{ijk} з урахуванням рівнів ВСШ $L = \{l_{ij}\}$ $\langle y_{ijk}|L\rangle$ на значення з виходів ГНМ $\gamma_{x_{ij}}(y_{ijk})$. Також аналітичний вигляд логарифмічних функцій визначення оцінки правдоподібності для вхідного x_S та еталонного x_t і-векторів аналогічні наведеним у (10), (11) і (15), (16) у [1] із урахувань таких замін:

$$\gamma_{x_s}(y_{k_s})\gamma_{x_t}(y_{k_t}) \to \gamma_{l_s,l_t}(y_{k_s}, y_{k_t}),\ \gamma_{x_s}(y_{k_s}) \to \gamma_{l_s}(y_{k_s}),\ \gamma_{x_t}(y_{k_t}) \to \gamma_{l_t}(y_{k_t}), \quad (4)$$

де l_s та l_t позначають рівень ВСШ вхідної та еталонної фонограм відповідно.

В результаті функція визначення оцінки правдоподібності набуде такого виду

$$S_{ГНМ-PLDA}(x_s, x_t) = \frac{\sum_{k_s=1}^{K}\sum_{k_t=1}^{K}\gamma_{x_s}(y_{k_s})\gamma_{x_t}(y_{k_t})e^{-0.5\log(\alpha\hat{\Lambda}_{k_s k_t})-0.5D\left(\left[x_s^T\ x_t^T\right]^T \left\|\left[m_{k_s}^T\ m_{k_t}^T\right]^T\right.\right)}}{\left(\sum_{k_s=1}^{K}\gamma_{x_s}(y_{k_s})e^{-0.5\log(\alpha\Lambda_{k_s})-0.5D(x_s\|m_{k_s})}\right)\left(\sum_{k_t=1}^{K}\gamma_{x_t}(y_{k_t})e^{-0.5\log(\alpha\Lambda_{k_t})-0.5D(x_t\|m_{k_t})}\right)}, \quad (5)$$

де α є скаляром для уникнення експоненціювання дуже великих від'ємних чисел (подальші результати отримано при $\alpha = 5$), $\hat{\Lambda}_{k_s k_t} = \hat{V}_{k_s}\hat{V}_{k_t}^T + \hat{\Sigma}_{k_s k_t}$, $\Lambda_{k_s} = V_{k_s}V_{k_s}^T + \Sigma_{k_s}$, $\hat{\Sigma}_{k_s k_t} = diag\{\Sigma_{k_s}, \Sigma_{k_t}\}$ та $D(x\|y)$ – відстань Махаланобіса між x і y.

ПОСТАНОВКА ЕКСПЕРИМЕНТУ ТА АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ

В якості бази фонограм для навчання та тестування створеної із застосуванням вищеописаного математичного апарату АСРМКЗ використано базу записів із безкоштовної бази даних NOIZEUS [13] – спеціалізованої бази даних Школи інжинірингу та комп'ютерних наук Еріка Джонсона при Університеті Техасу в Далласі, США, яка використовується для дослідження алгоритмів покращення звуку і складається з 30 речень англійської розмовної мови, вимовлених трьома чоловіками та трьома жінками (по 5 на кожного диктора, частота дискретизації записів складає 25 кГц, але задля додавання шуму була зменшена до 8 кГц) та записів типових побутових та техногенних шумів. В ході експерименту автоматизовану систему розпізнавання мовців критичного застосування навчали як фонограмами без додавання шумів, так і фонограмами із додаванням шуму. Навчальна вибірка містила 594 фонограми, де до чистого сигналу додавався штучний шум з рівнями шум/сигнал 0 дБ, 5 дБ, 10 дБ, 15 дБ відповідно. Навчання створеної системи проводилося на фонограмах всіх чотирьох типів відповідно до рівня ВСШ, за умови, що серед навчальної вибірки для кожного із мовців була хоча б одна фонограма із ВСШ = 0 дБ. До кожної чистої фонограми (із рівнем ВСШ=0) навчальної вибірки підмішувався запис акустичних шумів, вид та рівень ВСШ яких обирався випадково із мовної бази. В результаті на одну чисту фонограму припадало десять із рівнем ВСШ 5 дБ, 10 дБ або 15 дБ.

Для детектування інтервалів мовної активності у фонограмах використано двоканальний детектор (Voice activity detector, VAD) [14]. До детектованих інтервалів мовної активності застосовувалася нормалізація кепстрального середнього (Cepstral mean normalization, CMN) [1] і процедура вирівнювання ознак (Feature warping, FW) [15] із фреймом тривалістю 3 с, після чого сигнал розбивався на фрейми тривалістю 25 мс із перекриванням 5 мс із застосуванням віконної функції Хеммінга і з кожного фрейму екстрагувався 60-мірний вектор інформативних ознак, який включав в себе 19 Мел-кепстральних коефіцієнтів, їх енергію, першу та другу похідні.

Для екстрагування i-векторів автори створили гендерно-залежні універсальні фонові моделі із 1024

сумішами та матрицями загальної мінливості із 500 факторами. Далі *i*-вектори розділялися на K груп (діапазони рівнів ВСШ для віднесення *i*-вектора до k-ї групи $(k = 1,...,K)$ наведено у таблиці 1) відповідно до оціненого за методикою [1] рівня ВСШ і формували навчальну вибірку для ГНМ. Кількість *i*-векторів у кожній групі буда однакова. Вхідний шар ГНМ містив 500 нейронів вхідних вузлів і три прихованих шари ГНМ містили обмежені машини Больцмана (Restricted Boltzmann machine, RBM) [16], для навчання яких застосовувався алгоритм контрастної розбіжності (Contrastive divergence algorithm, CDA) [16]. Для переднавчання ГНМ використовувався міні-пакетний метод зв'язаних градієнтів (Mini-batch conjugate gradient descent, mBCGD) із 100 прикладами у пакеті для оцінювання градієнту. Навчений на етапі переднавчання для кращого узагальнення навчальних даних softmax-вихідний шар фіналізував створену ГНМ. Подальший етап тонкого налаштування ГНМ тривав 30 епох із застосуванням методу зв'язаних градієнтів для мінімізації перехресної ентропії між бажаними і реальними значеннями виходів мережі. Після навчання ГНМ набула здатності оцінювати апріорні імовірності груп SNR, що спостерігаються у вхідному *i*-векторі.

Таблиця 1

Границі діапазонів рівнів ВСШ, (дБ) для різної кількості груп за рівнем ВСШ (*K*)

K	Група 1	Група 2	Група 3	Група 4	Група 5
2	(-∞,20]	(20, ∞)	-	-	-
3	(-∞,10]	(10,20]	(20, ∞)	-	-
4	(-∞,10]	(10,15]	(15,20]	(20, ∞)	-
5	(-∞,5]	(5,10]	(10,15]	(15,20]	(20, ∞)

Перед навчанням PLDA-моделей із подібною до реалізованої у [1] структурою відбувалося нормування довжини *i*-векторів до 500 компонент і застосувався метод внутрікласового нормування коваріації (Within-class covariance normalization, WCCN) [1] для їх очищення. Далі застосовувався лінійний дискримінантний аналіз (Linear Discriminative Analysis, LDA) для зменшення їх корельованості в межах класу одного мовця, що дозволило зменшити довжини *i*-векторів до 200 компонент із збереженням адекватності даних навчальної вибірки. Потім здійснювалося навчання різних типів PLDA-моделей із 150 прихованими характеристичними для мовця факторами, а саме, звичайних гаусових PLDA; незалежних від рівня ВСШ PLDA [1] із заміною $\gamma_{x_{ij}}(y_{ijk})$ у (5) апріорною імовірністю k-суміші; залежних від рівня ВСШ PLDA [1] із заміною $\gamma_{x_{ij}}(y_{ijk})$ у (5) одновимірною GMM, яка описує розподіл рівня ВСШ; запропонованою у (5) ГНМ-PLDA із заміною $\gamma_{x_{ij}}(y_{ijk})$ у (5) значеннями з виходів налаштованої на детектування рівня ВСШ у вхідному *i*-векторі ГНМ.

Таблиця 2

Залежність критеріїв якості роботи АСРМКЗ від наборів навчальних та тестових даних і методу моделювання факторів

Набір навчальних даних	Метод моделювання		Мовці-чоловіки				Мовці-жінки			
			Тест. набір 1		Тест. набір 2		Тест. набір 1		Тест. набір 2	
			P+, %	minDCF	P+, %	minDCF	P+, %	minDCF	P+, %	minDCF
Набір 1	PLDA		100,00	0,32	97,14	0,30	96,87	0,36	97,53	0,35
	PLDA (і-век.+ВСШ)		100,00	0,32	97,07	0,30	96,90	0,35	97,62	0,34
	ВСШ незалежна PLDA	2 суміші	100,00	0,31	97,01	0,33	96,92	0,36	97,66	0,36
		3 суміші	100,00	0,32	97,06	0,32	97,02	0,36	97,45	0,37
		4 суміші	100,00	0,30	97,09	0,31	96,84	0,37	97,64	0,35
	ВСШ залежна PLDA	2 суміші	100,00	0,32	97,03	0,32	96,90	0,37	97,41	0,37
		3 суміші	100,00	0,33	97,14	0,31	97,40	0,34	97,41	0,34
		4 суміші	100,00	0,32	97,10	0,32	97,16	0,34	97,26	0,36
	ВСШ залежна PLDA із ГНМ	2 суміші	100,00	0,27	98,60	0,28	98,12	0,29	98,05	0,28
		3 суміші	100,00	0,26	98,63	0,27	98,14	0,29	98,11	0,29
		4 суміші	100,00	0,26	98,65	0,26	98,27	0,27	98,13	0,29
Набір 2	PLDA		100,00	0,33	96,91	0,33	97,06	0,36	97,36	0,37
	PLDA (і-век.+ВСШ)		100,00	0,33	96,77	0,32	97,02	0,36	97,28	0,34
	ВСШ незалежна PLDA	2 суміші	100,00	0,33	96,91	0,35	96,94	0,37	97,33	0,36
		3 суміші	100,00	0,33	96,79	0,32	97,18	0,36	97,41	0,35
		4 суміші	100,00	0,31	96,87	0,31	97,14	0,36	97,48	0,35
	ВСШ залежна PLDA	2 суміші	100,00	0,32	97,00	0,33	97,10	0,36	97,36	0,36
		3 суміші	100,00	0,32	97,00	0,33	97,10	0,36	97,33	0,36
		4 суміші	100,00	0,32	96,92	0,32	96,91	0,37	97,14	0,38
	ВСШ залежна PLDA із ГНМ	2 суміші	100,00	0,29	97,56	0,31	98,01	0,33	98,08	0,33
		3 суміші	100,00	0,31	97,87	0,30	98,04	0,30	98,17	0,31
		4 суміші	100,00	0,31	98,03	0,29	98,31	0,29	98,26	0,31

Результати поведених експериментів з розпізнавання мовців системою на базі відповідних PLDA моделей наведено у таблиці 2. Для оцінювання якості роботи АСРМКЗ використано два критерії: імовірність правильного розпізнавання P_+ та мінімальна функція вартості виявлення (minimum detection cost

function, minDCF) [1]. Функція вартості виявлення DFC обчислюється як зважена сума імовірності відмови мовцеві, який має право доступу, P_{fa} і імовірності надання доступу мовцеві, який такого права не має, P_{miss}: $DFC = 0.1P_{miss} + 0.01P_{fa}$. Відповідно, мінімум функції DFC визначається за отриманими оцінками результатів розпізнавання.

Результати у таблиці 2 демонструють перевагу ВСШЗ-PLDA і ГНМ-PLDA-моделей над PLDA і ВСШНЗ-PLDA-моделями. PLDA-модель показує найгірші результати, що можна пояснити відсутністю у математичному представленні моделі можливості урахування рівня ВСШ у фонограмах мовних сигналів. Решта моделей включають таку адаптацію, проте прослідковується тенденція до зростання показників ефективності, демонстрованих ГНМ-PLDA-моделлю із зростанням кількості детектованих рівнів ВСШ, адже можливість навчання ГНМ робить модель чутливішою, тоді як у ВСШЗ-PLDA-моделі межі рівнів ВСШ встановлюються дослідником емпірично. ВСШЗ-PLDA і ГНМ-PLDA-моделі мають високу адаптивність до рівня ВСШ у вхідних фонограмах тому, що при їх використанні результати розпізнавання мовців отримуються шляхом узагальнення оцінок PLDA, які базуються на апостеріорних імовірностях індикаторних змінних, що залежать від вхідних фонограм. Проте, ваги суміші ВСШНЗ-PLDA-моделі обчислюються лише на основі навчальних *i*-векторів і більше не зазнають змін що зменшує адаптивність цієї моделі суміші. Результати, показані ВСШЗ-PLDA і ГНМ-PLDA близькі тому, що у першій моделі апріорні імовірності y_{ijk} обчислюються із використанням 1-D GMM, яка описує розподіл рівня ВСШ, а у другій моделі апостеріорні імовірності обчислює чутлива до рівня ВСШ ГНМ. Проте, ВСШЗ-PLDA потребує інформації про рівень ВСШ тестових фонограм, а ГНМ-PLDA – ні, що робить останню універсальнішою.

ВИСНОВКИ

Автори запропонували удосконалений метод адаптації сумішей PLDA-моделей до присутності у фонограмах мовних сигналів, за якими АСРМКЗ здійснює розпізнавання мовців, динамічного рівня ВСШ. Метод заснований на використанні ГНМ для навчання УФМ, а саме, ГНМ у процесі навчання змінює ваги міжнейронних зв'язків для оптимального визначення діапазонів зміни рівня ВСШ у *i*-векторах, екстрагованих із навчальних фонограм. Результати емпіричних досліджень довели ефективність запропонованого удосконалення порівняно із класичними PLDA-моделями і запропонованими авторами у [1] ВСШЗ-PLDA і ВСШНЗ-PLDA. Окрім прецизійної точності детектування діапазонів рівнів ВСШ вхідних фонограм запропонований нейромережевий компонент PLDA-моделі може довільно масштабуватися за потребою дослідника і адаптуватися під умови експлуатації АСРМКЗ. До недоліків запропонованих удосконалень можна віднести обчислювальну складність процесу створення і навчання ГШМ, проте, математичний вираз (5) можна застосувати і для класичного персептрону, використання якого є суттєво ресурсоефективнішою.

Література

1. Ковтун В.В. Підвищення шумостійкості автоматизованої системи розпізнавання мовця критичного застосування / Т.В. Грищук, В.В. Ковтун // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2018. – № 1. – С. 98–111.
2. Reynolds D. A. Speaker verification using adapted Gaussian mixture models / D. A. Reynolds, T. F. Quatieri, R. B. Dunn // Digital Signal Processing. – 2000. – Vol. 10. – № 1. – P. 19–41.
3. Shao Y. Robust speaker identification using auditory features and computational auditory scene analysis / Y. Shao, D. Wang // IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). – 2008. – P. 1589–1592.
4. Elder J.H. Probabilistic linear discriminant analysis for inferences about identity / S.J.D. Prince, J.H. Elder // ICCV. – 2007. – P. 1–8.
5. Yaman S. Bottleneck features for speaker recognition / S. Yaman, J.W. Pelecanos, R. Sarikaya // Odyssey. – 2012. – Vol. 12. – P. 105–108.
6. Ghahabi O. Deep belief networks for i-vector based speaker recognition / O. Ghahabi, J. Hernando // ICASSP. – 2014. – P. 1700–1704.
7. Variani E. Deep neural networks for small footprint text-dependent speaker verification / E. Variani, X. Lei, E. McDermott, I. Lopez M., J. Gonzalez-Dominguez // ICASSP. – 2014. – P. 4052–4056.
8. Zhao X.J. Deep neural networks for cochannel speaker identification / X.J. Zhao, Y.X. Wang, D.L. Wang / ICASSP. – 2015. – P. 4824–4828.
9. Garcia-Romero D. Multicondition training of Gaussian PLDA models in i-vector space for noise and reverberation robust speaker recognition / D. Garcia-Romero, X. Zhou, C.Y. Espy-Wilson // ICASSP. – 2012. – P. 4257–4260.
10. McLachlan G. Mixtures of factor analyzers / G. McLachlan, D. Peel // Finite Mixture Models. – 2000. – P. 238–256.
11. Ghahramani Z. The EM algorithm for mixtures of factor analyzers / Z. Ghahramani, G.E. Hinton // Technical Report CRGTR-96-1, University of Toronto. – 1996.

12. Garcia-Romero D. Analysis of i-vector length normalization in speaker recognition systems / D. Garcia-Romero, C.Y. Espy-Wilson // Interspeech. – 2011. – P. 249–252.

13. Ковтун В.В. Оптимізація алфавіту інформативних ознак для автоматизованої системи розпізнавання мовців критичного застосування / А.О. Береза, М.М. Биков, А.Д. Гафурова, В.В. Ковтун // Вісник Хмельницького національного університету, серія: Технічні науки. – 2017. – № 3(249). – С. 222–228.

14. Ковтун В.В. Використання множини мікрофонів у автоматизованій системі розпізнавання мовця критичного застосування / М.М. Биков, В.В. Ковтун // Вісник Вінницького політехнічного інституту, Вінниця. – 2017. – № 3. – С. 84–91.

15. Hatch A. Within-class covariance normalization for SVM-based speaker recognition / A. Hatch, S. Kajarekar, A. Stolcke // ISCSLP, Pittsburgh. – 2006. – P. 1471–1474.

16. Bengio Y. Learning deep architectures for AI / Y. Bengio // Foundations and trends R in Machine Learning. – 2009. – Vol. 2. – № 1. – P. 1–127.

References

1. Kovtun V.V. Pidvyshchennia shumostiikosti avtomatyzovanoi systemy rozpiznavannia movtsia krytychnoho zastosuvannia / T.V. Hryshchuk, V.V. Kovtun // Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu. – 2018. – № 1. – S. 98–111.

2. Reynolds D. A. Speaker verification using adapted Gaussian mixture models / D. A. Reynolds, T. F. Quatieri, R. B. Dunn // Digital Signal Processing. – 2000. – Vol. 10. – № 1. – R. 19–41.

3. Shao Y. Robust speaker identification using auditory features and computational auditory scene analysis / Y. Shao, D. Wang // IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). – 2008. – R. 1589–1592.

4. Elder J.H. Probabilistic linear discriminant analysis for inferences about identity / S.J.D. Prince, J.H. Elder // ICCV. – 2007. – R. 1–8.

5. Yaman S. Bottleneck features for speaker recognition / S. Yaman, J.W. Pelecanos, R. Sarikaya // Odyssey. – 2012. – Vol. 12. – R. 105–108.

6. Ghahabi O. Deep belief networks for i-vector based speaker recognition / O. Ghahabi, J. Hernando // ICASSP. – 2014. – R. 1700–1704.

7. Variani E. Deep neural networks for small footprint text-dependent speaker verification / E. Variani, X. Lei, E. McDermott, I. Lopez M., J. Gonzalez-Dominguez // ICASSP. – 2014. – R. 4052–4056.

8. Zhao X.J. Deep neural networks for cochannel speaker identification / X.J. Zhao, Y.X. Wang, D.L. Wang / ICASSP. – 2015. – R. 4824–4828.

9. Garcia-Romero D. Multicondition training of Gaussian PLDA models in i-vector space for noise and reverberation robust speaker recognition / D. Garcia-Romero, X. Zhou, C.Y. Espy-Wilson // ICASSP. – 2012. – R. 4257–4260.

10. McLachlan G. Mixtures of factor analyzers / G. McLachlan, D. Peel // Finite Mixture Models. – 2000. – R. 238–256.

11. Ghahramani Z. The EM algorithm for mixtures of factor analyzers / Z. Ghahramani, G.E. Hinton // Technical Report CRGTR-96-1, University of Toronto. – 1996.

12. Garcia-Romero D. Analysis of i-vector length normalization in speaker recognition systems / D. Garcia-Romero, C.Y. Espy-Wilson // Interspeech. – 2011. – R. 249–252.

13. Kovtun V.V. Optymizatsiia alfavitu informatyvnykh oznak dlia avtomatyzovanoi systemy rozpiznavannia movtsiv krytychnoho zastosuvannia / A.O. Bereza, M.M. Bykov, A.D. Hafurova, V.V. Kovtun // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2017. – № 3(249). – S. 222–228.

14. Kovtun V.V. Vykorystannia mnozhyny mikrofoniv u avtomatyzovanii systemi rozpiznavannia movtsia krytychnoho zastosuvannia / M.M. Bykov, V.V. Kovtun // Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu, Vinnytsia. – 2017. – № 3. – S. 84–91.

15. Hatch A. Within-class covariance normalization for SVM-based speaker recognition / A. Hatch, S. Kajarekar, A. Stolcke // ISCSLP, Pittsburgh. – 2006. – R. 1471–1474.

16. Bengio Y. Learning deep architectures for AI / Y. Bengio // Foundations and trends R in Machine Learning. – 2009. – Vol. 2. – № 1. – R. 1–127.

Рецензія/Peer review : 27.1.2019 р. Надрукована/Printed :16.2.2019 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Бісікало О.В.

DOI 10.31891/2307-5732-2019-269-1-178-181
УДК 004.415

О.А. КРАВЧУК
Хмельницький національний університет

АНАЛІЗ НАЯВНОГО ПРОГРАМНО-ТЕХНІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЩОДО РОЗРОБКИ ПРОГРАМНОГО ПРОДУКТУ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ ОБРОБКИ ЗАМОВЛЕНЬ ІНТЕРНЕТ-МАГАЗИНІВ

В статті проводиться аналіз наявного програмно-технічного забезпечення щодо розробки програмного продукту для автоматизації обробки замовлень інтернет-магазинів та доводиться необхідність створення спеціального програмного забезпечення, що дозволить максимально ефективно отримувати замовлення інтернет-магазинів та оброблювати його в найкоротші терміни.

Ключові слова: інтернет-магазин, програмне забезпечення, новітні технології, відкритий код, розробка сайтів.

O.A. KRAVCHUK
Khmelnytskyi National University

ANALYSIS OF AVAILABLE SOFTWARE AND TECHNICAL SUPPORT FOR THE DEVELOPMENT OF SOFTWARE PRODUCT FOR AUTOMATION OF PROCESSING OF INTERIENT-STORES ORDERS

The article analyzes the existing software and hardware for the development of a software product for the automation of order processing of online stores, and it is necessary to create a special software that will allow you to get the orders of online stores as efficiently as possible and process them as soon as possible. Anyone who has ever been busy filling the online store with goods knows what kind of laborious work: for each product you must enter a name, photo, description, price, quantity of goods in stock, delivery terms. A full-fledged store with a large assortment is easy to create, you can not even develop your own, but use ready-made projects, which are just a little needed to be changed and put into a general overview. Of course, as in everything, opening is not an equality of success, it is necessary to develop. But the start is really extremely simple and everyone can shop online now. Millions of customers choose goods and buy them only on the Internet, because the virtual store does not need large retail space, many staff. The product is purchased directly from the manufacturer, posted on a site with a minimum markup. Competition in this area is not less than in stores outside the Internet. Many people are no longer worried about warranty obligations, delivery and quality of the product - everything is quick, convenient and professional. The quality of services and goods is often not worse than in ordinary stores, and the price is much less. Therefore, even the most conservative networks are trying to sell and through the Internet to at least somehow compete with online stores. Also, the entrepreneur demands a lot of attention and the sale of goods sold through the Internet. With the development of the online store, the assortment of the store, the number of suppliers increases, and, accordingly, the number of buyers is increasing. The store opens the points of delivery of goods in certain regions of the country, which usually perform the functions of ordinary stores. That is, the seller can check the presence of a certain product in the warehouse store and place an order for the goods to the buyer when it is available. In this case, the processing of orders is complicated, because it is necessary to take into account the presence of goods in the stores of a certain region, certain logistical moments. Typically, CMS is not designed to process orders under such conditions and it requires the use of special software that will allow you to get orders as efficiently as possible and process them as quickly as possible.

Keywords: online store, software, the latest technology, open source, web development.

Постановка проблеми. Той, хто хоч раз займався наповненням інтернет-магазину товарами, знає, яка це кропітка праця: для кожного товару потрібно ввести найменування, фото, опис, ціну, кількість товарів в наявності, умови доставки. Також великої уваги підприємця вимагає і облік проданих через інтернет товарів [1].

Повноцінний магазин з великим асортиментом створити досить просто, можна навіть не розробляти власний, а використовувати готові проекти, які лише злегка потрібно змінити та викласти на загальний огляд. Звичайно, як і в усьому, відкриття не є рівність успіху, потрібно розвиватися. Але старт дійсно надзвичайно простий та торгувати через інтернет зараз може кожен. Мільйони покупців вибирають товари і купують їх тільки в Інтернеті, адже віртуальному магазину не потрібні великі торгові площі, багато персоналу. Товар купується безпосередньо у виробника, викладається на сайті з мінімальними націнками. Конкуренція в цій сфері не менше, ніж у магазинах поза Інтернетом. Багато людей вже не турбуються про гарантійні зобов'язання, доставку та якість товару − все швидко, зручно і професійно. Якість послуг і товару часто не гірша, ніж у звичайних магазинах, а ціна значно менше. Тому навіть найбільш консервативні мережі намагаються продавати і через інтернет, щоб хоч якось складати конкуренцію інтернет-магазинам. Ефективна організація інтернет-магазину передбачає обробку замовлень як один з ключових моментів в роботі. Якщо ваш магазин працює на CMS (системі керування сайтом), в системі усе вже є «з коробки», ви отримаєте всі необхідні інструменти. Коли відвідувач оформляє замовлення в інтернет-магазині, інформація про замовлення зберігається в базі даних. На одній зі сторінок сайту адміністрування співробітник інтернет-магазину може переглядати список нових замовлень і опрацьовувати їх [2].

У найпростішому випадку менеджер обробляє замовлення, вибираючи їх по одному із списку замовлень. Обробка полягає у перевірці контактної інформації покупця, а також узгодженні з покупцем часу і місця доставки (зазвичай по телефону або електронною поштою). За необхідності менеджер може відкласти обробку замовлення, залишити коментар або позначку, наприклад, про необхідність зв'язатися з клієнтом пізніше.

З розвитком інтернет-магазину зростає асортимент магазину, кількість постачальників, а,

відповідно, і кількість покупців збільшується. Магазин відкриває точки видачі товарів в певних регіонах країни, які зазвичай виконують функції звичайних магазинів. Тобто продавець може перевірити на місці наявність певного товару на складах магазину й оформити замовлення товару покупцеві при його наявності.

В такому випадку ускладнюється обробка замовлень, оскільки необхідно враховувати наявність товарів на торгових складах певного регіону, певні логістичні моменти. Зазвичай CMS не розраховані на обробку замовлень за таких умов і виникає необхідність використовувати спеціальне програмне забезпечення, що дозволить максимально ефективно отримати замовлення та обробити його в найкоротші терміни [3].

Формулювання цілей статті. Провести аналіз наявного програмно-технічного забезпечення розробки програмного продукту для автоматизації обробки замовлень інтернет-магазинів та довести необхідність створення спеціального програмного забезпечення, що дозволить максимально ефективно отримувати замовлення та оброблювати його в найкоротші терміни.

Виклад основного матеріалу дослідження. Розглянемо основні існуючі рішення для агрегованої обробки замовлень інтернет-магазинів [4, 5].

Облік для інтернет-магазину в програмі «ТоргСофт». З'ясуємо, що вона собою являє, для чого потрібна і як працює. Ця програма дозволяє проводити обмін даними між інтернет-магазином і автономною програмою. Інформація про товари та ціни надходить з програми на сайт магазину, а замовлення з сайту надходять до програми.

Головне вікно програми «ТоргСофт» зображене на рис. 1.

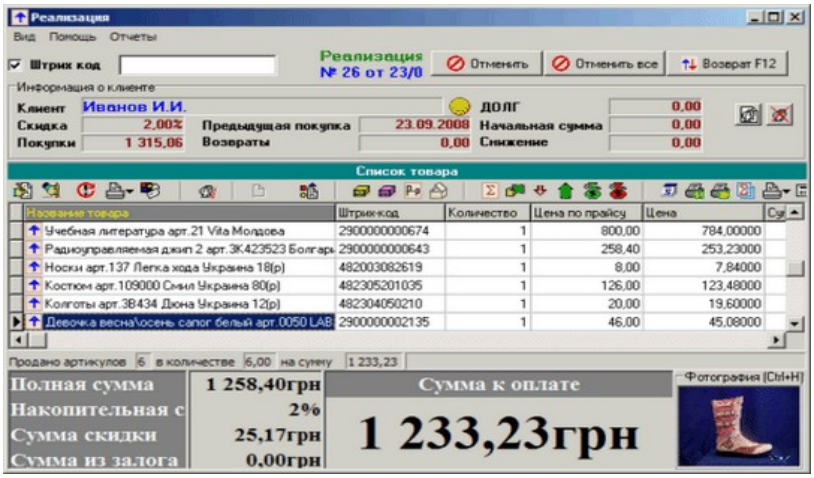


Рис. 1. Головне вікно програми «ТоргСофт»

Завдяки функції синхронізації власник інтернет-магазину позбавлений частини цих завдань, тому що всі дані про товари автоматично передаються з програми на сайт, а в програму так само автоматично надходять дані про замовлення та реєструються продажі. Таким чином, власник магазину завжди знає актуальний стан товарів на складі, а покупець − інформацію про наявність і ціни товарів.

Синхронізація додатку «ТоргСофт» з інтернет-магазином відбувається за допомогою файлу формату CVS, який відправляється за допомогою FTP на сервер сайту при натисканні на кнопку «Синхронізувати».

Всі налаштування обміну даними між сайтом і програмою «ТоргСофт» виконуються в меню «Склад» в пункті меню «Синхронізація з інтернет-магазином». На сайт можна вивантажувати всі товари з програми, або тільки вибрані товарні групи, також можлива синхронізація за визначеними виробниками.

В цьому ж меню вибирається сайт, з яким буде проходити обмін даними (якщо у користувача декілька інтернет-магазинів). В даній програмі користувач має можливість обирати касу, в яку будуть надходити оплати для подальшого фінансового обліку підприємця. У програмі налаштовується час синхронізації, коли буде автоматично відбуватися обмін даними. Тобто система сама буде відправляти і приймати з сайту всі зміни по заданому розкладу. Це може бути корисно, коли в силу специфіки товару в інтернет-магазині часто міняється асортимент, ціни, наявність. При необхідності відправити дані "позапланово" це можна зробити вручну.

Товари в каталозі на сайті групуються для зручності навігації покупців. А групи товарів для внутрішнього обліку в програмі розбиті більш детально. Найчастіше класифікація товарів для сайту і "для себе" різняться. Щоб при відправці даних на сайт усі товари потрапили на свої місця, в програмі потрібно вказати, до якої групи товарів на сайті він відноситься.

В додатку наявний функціонал за допомогою якого відправляються фотографії, прикріплені до опису товару в програмі. Програма може завантажувати фото в графічних форматах: jpg, gif, bmp. Зображення можуть бути різного розміру.

Всі замовлення з інтернет-магазину надходять і обробляються в розділі «Документ» підрозділу «Замовлення віддаленого клієнта».

Коли покупець сформував в інтернет-магазині заявку, в програму «ТоргСофт» надходить замовлення клієнта, яке містить: дані про клієнта, що вказані при реєстрації (ПІБ, телефон, e-mail, адреса); дані про замовлені товари (назва, ціна, кількість).

«ТоргСофт» зіставляє отримані дані з даними з бази клієнтів і, якщо вони збігаються, програма впізнає його як постійного покупця, у якого може бути право на знижки.

Менеджер погоджує з клієнтом замовлення та умови доставки, якщо потрібно вносить коригування та одразу виписує рахунок. Звіт створюється програмою автоматично на основі замовлення.

Програма містить два основних недоліки, перший це синхронізація за часом, тобто не в режимі реального часу, по друге висока вартість програми.

«Melbis Shop Trader» − це windows-програма для менеджерів інтернет-магазину для автоматизації прийому та обробки замовлень. Програма дозволяє приймати та зберігати замовлення, обробляти їх без підключення до інтернету, а потім передавати їх на сервер в єдиний центр.

Розглянемо основні можливості даної програми.

Це окрема windows-програма для швидкого та простого оновлення даних магазину та обліку покупців й замовлень.

Програма містить додатковий альтернативний веб-інтерфейс для управління замовленнями магазину. Крім цього, додаток має можливість обробки замовлень за допомогою КПК або смартфону. Ця функція буде зручна для тих, хто часто перебуває поза офісом або бажає мати контроль над роботою магазину під час відрядження чи відпустки.

Дана програма має додаткову універсальність, за рахунок декількох модулів синхронізації та має можливість обслуговування необмеженого числа магазинів.

В цьому додатку можлива установки серверної частини на малопотужний хостинг. Також наявна спеціальна система передачі та оновлення даних, яка дозволяє швидко передавати дані на сервер, що дуже актуально для магазинів з асортиментом в кілька десятків тисяч найменувань товарів.

Головне вікно програми «Melbis Shop Trader» зображене на рис. 2.

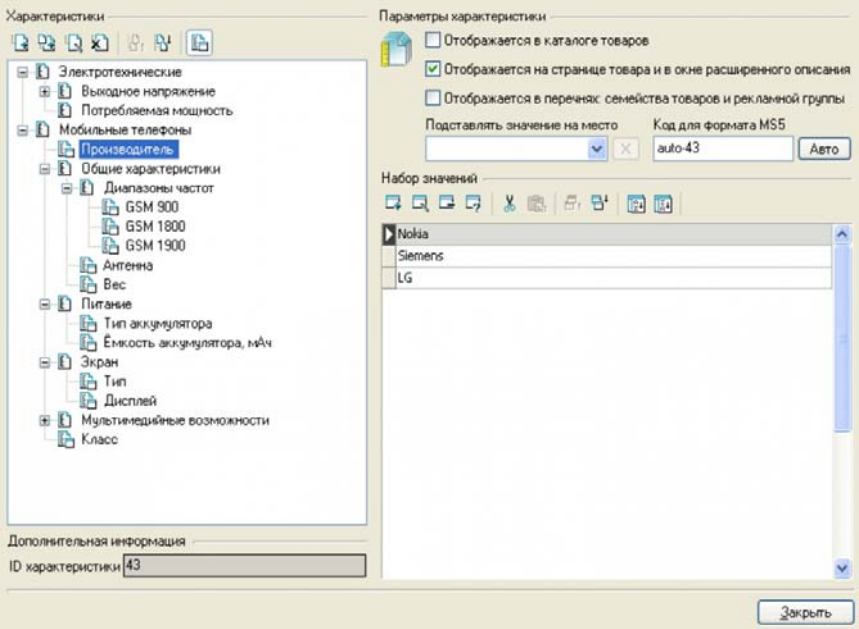


Рис. 2. Головне вікно програми «Melbis Shop Trader»

Перевагою даного комплексу є використання деревовидної структури для організації майже всіх елементів магазину. Разом з системою Drag & Drop це надає вагомі переваги, особливо при необхідності частого додавання нового виду товарів.

Імпорт здійснюється файлом у текстовому форматі з роздільником колонок − знаком табуляції (підтримує Microsoft Excel, 1С: Бухгалтерія). Важливими елементами є функція коректного імпорту характеристик товарів з автоматичним розподілом їх по дереву характеристик, а також функція автоматичної побудови дерева розділів. Причому остання дозволяє перейменовувати та/або переносити розділ в ході роботи: при подальшому оновленні система правильно ідентифікує відповідний розділ.

Дана програма дозволяє створювати додаткові розділи-сторінки магазину, перетворюючи його в повноцінний сайт. Причому редагування вмісту сторінок здійснюється через візуальний редактор, аналогічний Microsoft Word.

В програмі наявний конфігуратор товарів, за допомогою якого покупці можуть швидко та зручно замовити цілу низку товарів пов'язаних між собою. Наприклад, зібрати з комплектуючих свій комп'ютер.

Програма містить персональний розділ покупця. Він включає в себе такі можливості: редагування реєстраційних даних, коригування ще неприйнятих до виконання замовлень, перегляд загального переліку

замовлень та формування рахунків на оплату.

Перевагою даного додатку є проста система перегляду та управління замовленнями, яка допоможе менеджеру не тільки легко обробити замовлення, а й швидко знаходити їх в архіві. Дозволяє встановлювати статуси замовлень залежно від ходу їх виконання та отримання оплати.

Так само як і попередня програма «Melbis Shop Trader» має два основних недоліки, ця програма розповсюджується по користувацькій ліцензії, ліцензія на одного користувача коштує 114$ та має файлову синхронізацію.

«Supasoft» − універсальна програма обліку, платформа для розробки персональних конфігурацій для обліку клієнтів, продажів, замовлень, витрат, доходів і будь-яких інших даних.

Можливості даної платформи: повна настройка зовнішнього вигляду карток і таблиць; налаштування інтерфейсу під вимоги менеджера; мультивалютний облік; облік надходжень зі складу; облік заявок, замовлень, платежів та заборгованостей клієнтів.

Для синхронізації з магазинами дана система використовую модуль сторонньої системи, а саме програми обліку 1С. Головне вікно програми «Supasoft» зображено на рис. 3.

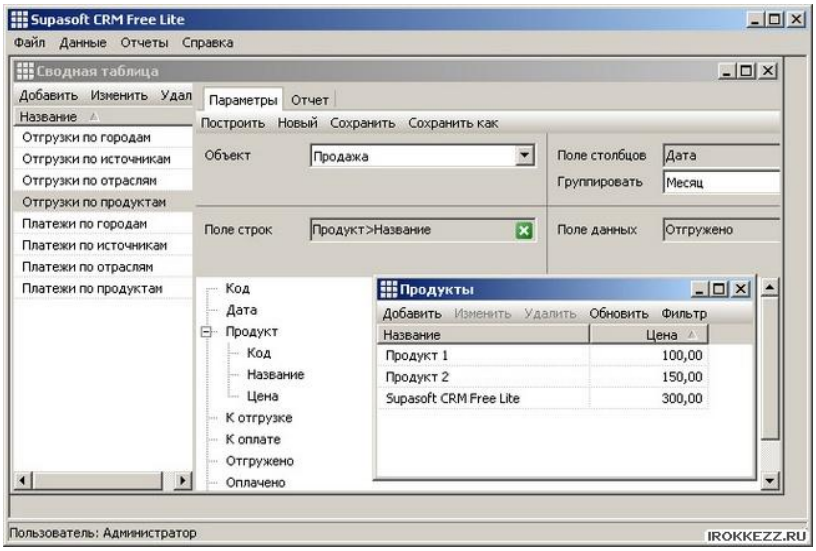


Рис. 3. Головне вікно програми «Supasoft»

Висновки. Всі розглянуті існуючі рішення мають один суттєвий недолік вони не відстежують стан інтернет-магазину в режимі он-лайн. Отже, виникає необхідність створення спеціального програмного забезпечення, що дозволить максимально ефективно отримувати замовлення та оброблювати його в найкоротші терміни.

Література

1. http://www.moysklad.ru/internet-magazinam
2. http://www.shop2you.ru/articles/internet_shop7.shtml
3. Пасічник В.В. Глобальні інформаційні системи та технології (моделі ефективного аналізу, опрацювання та захисту даних) / Пасічник В.В., Жежнич П.І., Кравець Р.Б., Пелещишин А.М., Тарасов Д.М. – Львів : Вид-во Національного університету "Львівська політехніка", 2006. – 350 с.
4. Кравчук О.А. Огляд та аналіз архітектури прогресивних веб-додатків / О.А. Кравчук // Вісник Хмельницького національного університету. – Хмельницький : ХНУ, 2017. – № 5. – 248 с.
5. Кравчук О.А. Аспекти переходу на HTTP2 / Ольга Кравчук // Вісник Хмельницького національного університету. – Хмельницький : ХНУ, 2016. – № 5. – 261 с.

References

1. http://www.moysklad.ru/internet-magazinam
2. http://www.shop2you.ru/articles/internet_shop7.shtml
3. Pasichnyk V.V. Hlobalni informatsiini systemy ta tekhnolohii (modeli efektyvnoho analizu, opratsiuvannia ta zakhystu danykh) / Pasichnyk V.V., Zhezhnych P.I., Kravets R.B., Peleshchyshyn A.M., Tarasov D.M. – Lviv : Vyd-vo Nats. universytetu "Lvivska politekhnika", 2006. – 350 s.
4. Kravchuk O.A. Ohliad ta analiz arkhitektury prohresyvnykh veb-dodatkiv / O.A. Kravchuk // Herald of Khmelnytskyi National University. – Khmelnytskyi : KhNU, 2017. – № 5. – 248 s.
5. Kravchuk O.A. Aspekty perekhodu na HTTP2 / Olha Kravchuk // Herald of Khmelnytskyi National University. – Khmelnytskyi : KhNU, 2016. – № 5. – 261 s.

Рецензія/Peer review : 05.02.2019 р. Надрукована/Printed :16.2.2019 р.
Рецензент: д. техн. н., доц. Синюк О.М.

DOI 10.31891/2307-5732-2019-269-1-182-186
УДК 621.317

В.С. ПЕТРУШАК
Хмельницький національний університет

АНАЛІЗ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ АМПЛІТУДИ, ЩО БАЗУЮТЬСЯ НА ПЕРЕТВОРЕННІ ЗМІННОГО СТРУМУ В ПОСТІЙНИЙ

Досліджено роботу пасивних перетворювачів амплітудних значень (ПАЗ) з відкритим входом на основі діода Шотткі MBR0520L фірми "ON Semiconductor". Розглянуто та досліджено схеми активних ПАЗ. Вказано на переваги та недоліки використання пасивних та активних ПАЗ. Представлена залежність похибки вимірювання амплітуди змінного сигналу від його частоти. Дані залежності отримано за допомогою амплітудного детектора (АД) на основі діода Шотткі та за допомогою схеми активного ПАЗ. Встановлено, що використання сучасних високошвидкісних діодів Шотткі унеможливлює вимірювання амплітуд сигналів менше 0,2В. Встановлено, що застосування активних перетворювачів дозволяє усунути цей недолік, але призводить до зміни коефіцієнта перетворення залежно від частоти вхідного сигналу.

Ключові слова: *амплітуда, амплітудний детектор, перетворювач амплітудних значень.*

V.S. PETRUSHAK
Khmelnytskyi National University

ANALYZE DEVICES FOR AMPLITUDE MEASUREMENT BASED ON AC CONVERTING TO DC

Means of measuring various parameters and technical characteristics of radio equipment always occupy leading positions in science and technology. Without precise definition of the corresponding values it is impossible to construct modern high-quality radio communication systems, radar, navigation ground and satellite systems. Ukraine has significant achievements in the field of metrology and radio measurements. So in the practice of electro-radio measurement, voltage measurement is a widespread operation. In this case, the difference in potentials or the voltage drop in the area of the electric circuit (on its element) is determined. The purpose of measuring the constant voltage is to determine its value and polarity sign. When measuring the voltage variable, any of its parameters (amplitude, average, rms, median directional value or signal swing) can be determined. Accordingly, the improvement of known methods for the creation of new converters of high frequency periodic signals into the code is a promising task at the present stage of development of measuring technology. The work of passive converters of amplitude values with open input on the basis of Schottky diode MBR0520L ON Semiconductor company is investigated. The schemes of active converters of amplitude values are considered and investigated. The advantages and disadvantages of the use of passive and active converters of amplitude values are indicated. The dependence of the error of measuring the amplitude of the variable signal on its frequency is presented. These dependences are obtained using an amplitude detector based on the Schottky diode and using the circuit of an active converter of amplitude values. It is established that the use of modern high-speed Schottky diodes makes it impossible to measure amplitudes of signals less than 0,2 V. It is established that the use of active converters can eliminate this defect, but it leads to a change in the conversion factor depending on the frequency of the input signal.

Keywords: *amplitude, amplitude detector, converter of amplitude values.*

Вступ

Засоби вимірювання різноманітних параметрів та технічних характеристик радіотехнічних засобів завжди займали провідні позиції в науці та техніці. Без точного визначення відповідних значень неможлива побудова сучасних якісних систем радіозв'язку, радіолокації, навігаційних наземних та супутникових систем.

Україна має значні досягнення в галузі метрології та радіовимірювань. Так в практиці електрорадіовимірювань вимірювання напруги є поширеною операцією. При цьому визначається різниця потенціалів чи падіння напруги на ділянці електричного кола (на її елементі). Метою вимірювання постійної напруги є визначення її значення і знака полярності. При вимірюванні змінної напруги може бути визначений будь-який її параметр (амплітудне, середнє, середньоквадратичне, середньовипрямлене значення чи розмах сигналу).

Зусилля видатних науковців спрямовані на покращення метрологічних та технічних показників існуючих засобів вимірювання, зокрема на розробку нових методів корекції характеристики перетворення вимірювального каналу, що є їх головною складовою [1].

Відповідно вдосконалення відомих методів для створення нових перетворювачів високочастотних періодичних сигналів в код є перспективною задачею на сьогоднішньому етапі розвитку вимірювальної техніки [2].

Постановка завдання

Для вимірювання параметрів напруги змінного струму можуть бути використані методи, які застосовуються для вимірювання напруги постійного струму.

Структурні схеми цифрових вольтметрів змінного струму відрізняються від структурних схем аналогічних типів вольтметрів постійного струму наявністю вимірювального перетворювача змінної напруги в постійну [3].

Для компенсації малої чутливості окремих перетворювачів використовують підсилювачі. Якщо підсилювачі включають у схему до перетворювача, то вони повинні мати широку смугу частот пропускання. Після перетворювача використовується підсилювач постійного струму. У найпростіших вольтметрах змінного струму підсилювачі можуть бути відсутніми.

Результати дослідження

Існує багато способів перетворення амплітудного значення електричних сигналів, однак найпоширенішими у вимірювальній техніці є пасивні ПАЗ, в основу яких покладений принцип запам'ятовування максимального значення змінної напруги.

Пасивні ПАЗ являють собою діодно-конденсаторні випрямні схеми з однопівперіодним випрямленням, які будують з відкритими та закритими входами. Принципова різниця між цими схемами полягає в тому, що схема із відкритим входом пропускає сталу складову вхідного сигналу, а із закритим входом – не пропускає.

При вимірюванні амплітуди змінного сигналу АД напруги до 1В результати значно відрізняються від дійсних значень. На рис. 1 та рис. 2 представлені результати вимірювань амплітуди змінного сигналу АД, зібраного за класичною схемою ПАЗ з відкритим входом на основі діода Шотткі MBR0520L фірми "ON Semiconductor" [3].

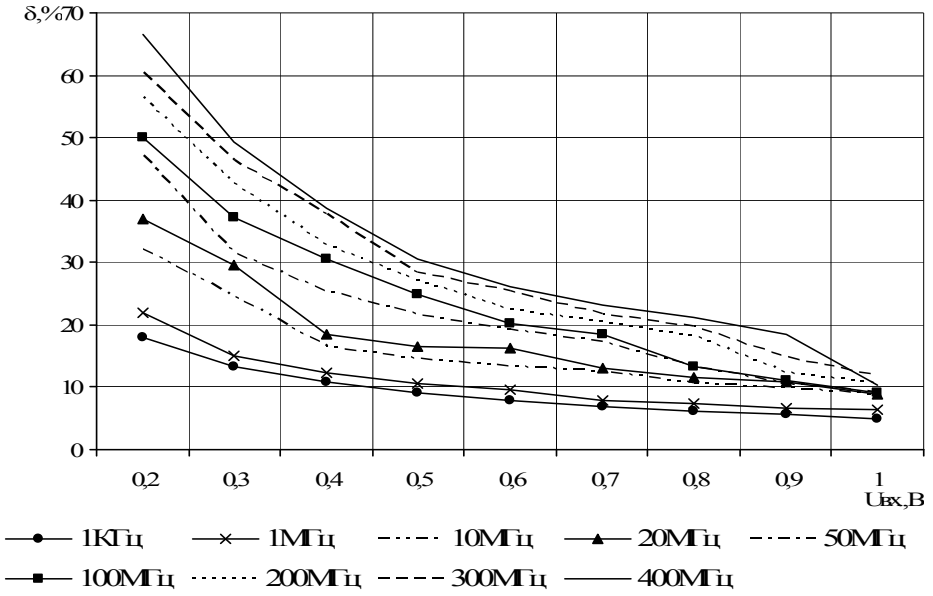


Рис. 1. Результати вимірювання амплітуди до 1В за допомогою детектора (діод MBR0520L) на частотах вхідного сигналу від 1 КГц до 400 МГц

Похибка вимірювання зростає із зменшенням напруги вхідного сигналу (рис. 1). Зокрема в діапазоні частот від 1КГц до 100МГц спостерігається збільшення відносної похибки вимірювання з 22% до 50% при встановленні вхідної напруги сигналу 0,2 В. А в діапазоні частот від 500 МГц до 1 ГГц (рис. 2) при тому ж значенні вхідної напруги відносна похибка вимірювання знаходиться в межах від 69% до 77%. Такі результати вказують на недоцільність використання АД для вимірювання амплітуди малих напруг, що пов'язано з не лінійністю вольт-амперної характеристики діода, що є головним його недоліком, який проявляється при вимірюванні малих сигналів.

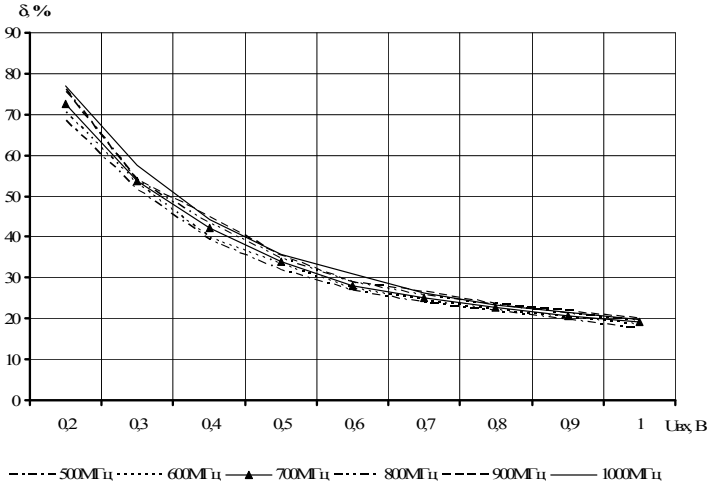


Рис. 2. Результати вимірювання амплітуди в діапазоні частот від 500 МГц до 1 ГГц за допомогою детектора (діод MBR0520L)

З графіка, представленого на рис. 2, видно, що підвищення частоти від 500 МГц до 1 ГГц призводить до погіршення результатів вимірювання. Зокрема при вимірюванні напруги від 0,6 В до 0,2 В відносна похибка знаходиться в межах від 27% до 69% на частоті досліджуваного сигналу 500 МГц.

Пасивні ПАЗ використовуються здебільшого на вході вимірювальних приладів амплітудних (пікових) значень електричних сигналів, в яких випрямлення сигналу передує його підсиленню. Для покращення метрологічних характеристик, зокрема підвищення точності, зменшення порогу чутливості і розширення діапазону перетворення в бік малих значень застосовують активні ПАЗ, побудовані на операційних підсилювачах.

Так в двокаскадному амплітудному детекторі, схему якого представлено на рис. 3 [4], при зростанні вхідної напруги $u_{вх}(t)$ діод VD1 зміщується в прямому напрямку та підключає $C_з$ до виходу операційного підсилювача (ОП) A1. При зменшенні $u_{вх}(t)$ діод VD1 зміщується у зворотному напрямі, відключаючи конденсатор $C_з$ від виходу підсилювача, і на $C_з$ зберігається раніше встановлена максимальна напруга. Діод VD2 фіксує вихідну напругу ОП на рівні $U_д$ – напруга діода, що зменшує час, необхідний для переходу від режиму зберігання до режиму вибірки. Коло Reset розряджає конденсатор $C_з$ до нуля перед новим циклом детектування.

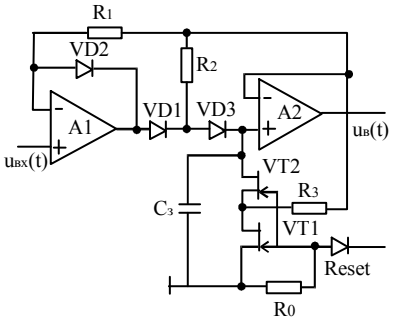


Рис. 3. Двокаскадний амплітудний детектор

Для розв'язки $C_з$ від навантаження на виході детектора включають повторювач в коло загального зворотного зв'язку з вхідним ОП A1, що зменшує додаткову похибку детектування, зумовлену напругою зміщення нуля, вхідними струмами і кінцевим підсиленням за допомогою ОП A2. Похибку амплітудного детектора характеризують зміною напруги на конденсаторі $C_з$ в режимі зберігання і похибкою вибірки. Напруга на $C_з$ змінюється в режимі зберігання завдяки наявності вхідних струмів ОП і струмів діодів, польового транзистора в колі Reset. Для зменшення впливу струмів витоку діода VD1 включають додатковий діод VD3 і резистор R_2. У режимі зберігання через R_2 протікає невеликий струм витоку діода VD1, завдяки цьому напруга на VD3 близька до нуля і практично відсутній струм витоку через цей діод в конденсатор $C_з$. Для зменшення струму витоку в конденсаторі $C_з$ з кола Reset в схему додатково включені транзистор VT2 і резистор R_3. У режимі зберігання через резистор R_3 протікає невеликий струм витоку транзистора VT1 (менше 10 нА) і напруги на емітері та колекторі VT2 майже рівні $u_в(t)$. Тому струм витоку між емітером та колектором VT2 зумовлений тільки невеликим струмом витоку емітер-база.

Недоліком схеми є те, що опір відкритого кола Reset подвоюється. Це призводить до збільшення залишкової напруги на $C_з$ при включенні кола Reset.

При ввімкненні кола Reset через замкнутий VT1 протікає великий струм (близько 10 мА), що розряджає конденсатор $C_з$, Який створює значне падіння напруги на опорі R_0 відкритого польового транзистора. Тому уповільнюється розряд $C_з$, що призводить до появи зони нечутливості амплітудного детектора при швидкій зміні циклів детектування. Тому залишкова напруга на конденсаторі $C_з$ є помилковим першим екстремумом досліджуваної вхідної функції.

Для зменшення залишкової напруги вихід підсилювача A1 шунтують додатковим польовим транзистором, що працює синхронно з VT1. Завдяки цьому вихідний струм A1 не протікає через VT1 доти, доки напруги на виході A1 менше напруги на відкритому діоді VD1. У такій схемі типи транзистора і підсилювача необхідно вибирати враховуючи мінімальне значення опору відкритого транзистора і максимального вихідного струму ОП. Залишкову позитивну напругу кола Reset можна також усунути, якщо $C_з$ розряджається до негативної напруги. В цьому випадку амплітудний детектор реагує на максимуми позитивної напруги будь-якої амплітуди.

Статичні похибки вибірки зумовлені не ідеальністю ОП. Динамічні похибки вибірки виникають завдяки обмеженій швидкості зростання вихідної напруги підсилювача і викидів перехідного процесу при заряді $C_з$.

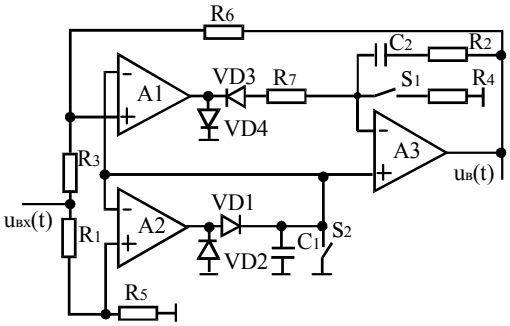


Рис. 4. Двопівперіодний амплітудний детектор

Час вибірки амплітудного детектора – це мінімальний час, необхідний для переходу з режиму зберігання в режим слідування за вхідним сигналом із заданою точністю. Цей час визначається тривалістю заряду конденсатора і встановленням вихідної напруги із заданою точністю. Якщо цей час буде більшим, ніж тривалість максимуму вхідного сигналу, то амплітудний детектор не зафіксує його дійсної величини.

Окрім однопівперіодних АД існують двопівперіодні АД (рис. 4) [5], які складаються з суміщених детекторів, призначених для обробки додатної та від'ємної півхвилі вхідного сигналу.

Амплітудний детектор додатної півхвилі вхідного сигналу виконаний на підсилювачі A2, діодах

VD1 і VD2 і конденсаторі C_1. Зменшення в два рази сигналу на вхідному резистивному подільнику R_1, R_3 компенсується далі підсилювачем А3, тому загальне підсилення вхідного сигналу дорівнює одиниці. Підсилювачі А3 і А1 разом з своїми елементами в колі зворотного зв'язку реалізують інвертуючий амплітудний детектор від'ємної півхвилі вхідного сигналу. У цій схемі вихід детектора додатної півхвилі забезпечує опорну напругу для детектора від'ємної півхвилі. Завдяки цьому підсилювач А3 підсумовує підсилений вихідний сигнал детектора додатної півхвилі з вихідною напругою детектора від'ємної півхвилі. Коло резистивного подільника R_1, R_3 використовується для узгодження напруг зміщення сигналів обох детекторів.

Крім того, відповідно підібраними ємностями можна компенсувати вплив вхідних струмів підсилювачів А1 і А2 на швидкість спаду напруги на конденсаторі C_1. При рівності вхідних струмів всіх трьох ОП умова компенсації визначається співвідношенням $C_1=3C_2$. Для визначення похибки двопівперіодного детектора необхідно додати похибки детекторів додатної і від'ємної півхвилі вхідного сигналу, враховуючи, що вхідний подільник подвоює напругу зміщення нуля підсилювача А2. Резистивний подільник R_2 в два рази збільшує напругу зміщення нуля А3, а посилення в колі зворотного зв'язку подвоює похибку коефіцієнта передачі підсилювача А3.

Швидкість роботи двопівперіодного детектора обмежується в першу чергу тривалістю перехідного процесу на конденсаторах, а при великому опорі резистора R_2 час готовності схеми значно збільшується завдяки обмеженій швидкості заряду конденсатора C_2. Підсилювачі А1 і А2 повинні зберігати великий вхідний опір при вхідних перевантаженнях для уникнення розряду С1 в режимі зберігання.

Вплив частотної похибки на результати вимірювання АД, побудованого на основі діода Шотткі MBR0520L та ОП LT1809 [6], з розширенням діапазону амплітудних значень в бік малих напруг представлено на рис. 5.

Використання ОП в амплітудних детекторах дозволяє суттєво зменшити похибку вимірювання амплітудних значень напруг малих сигналів (0,2 В) з 22% (рис. 1) до 4% (рис. 5). Але при цьому значно звужується частотний діапазон. Тобто при амплітуді вхідного періодичного сигналу 0,1 В та частоті 6 МГц відносне значення частотної похибки становить 40%; при характеристиках вхідного сигналу 0,3 В та 7 МГц - $\delta = 36{,}67\%$; при характеристиках вхідного сигналу 0,6 В та 8 МГц – $\delta = 31{,}67\%$.

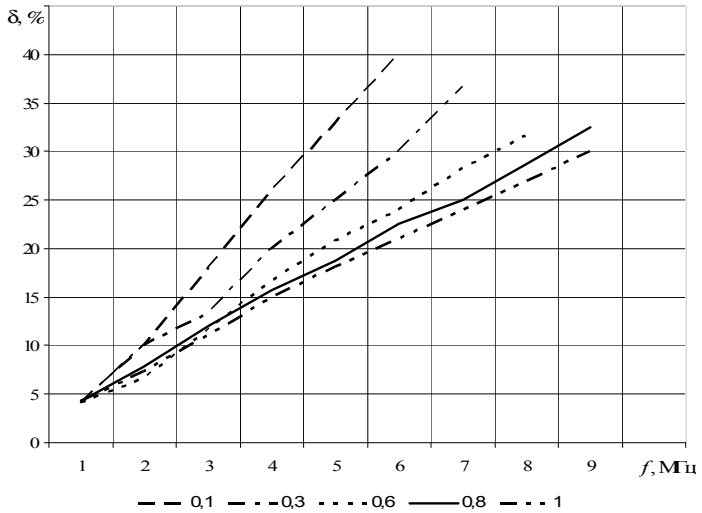


Рис. 5. Вплив частотної похибки на результати вимірювання однопівперіодним АД

Отже, навіть використання в схемах активних ПАЗ широкосмугового операційного підсилювача LT1809, який працює на частотах до 360 МГц дозволяє здійснювати вимірювання лише в діапазоні робочих частот до 10 МГц.

Висновки

1. В результаті огляду засобів перетворення змінної напруги в постійну для вимірювання її амплітудного значення встановлено вплив головного недоліку перетворювача на основі амплітудного детектора, що пов'язаний з не лінійністю вольт-амперної характеристики діода.

2. Встановлено, що навіть використання сучасних високошвидкісних діодів Шотткі унеможливлює вимірювання амплітуд сигналів менше 0,2 В. Застосування ж активних перетворювачів дозволяє усунути цей недолік, але призводить до зміни коефіцієнта перетворення в залежності від частоти вхідного сигналу.

3. З'ясовано, що вказані недоліки ускладнюють використання перерахованих методів і засобів для контролю таких швидкоплинних процесів, як наприклад, швидке виділення теплової енергії під час ланцюгової реакції в атомному реакторі (час реакції 10^{-4}-10^{-8}с) чи різке посилення процесу кавітації в нафтопроводі під час транспортування нафти.

Література

1. Петрушак, О. М. Особливості вимірювання амплітуди періодичних сигналів / О. М. Петрушак, В. С. Петрушак // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2012. – № 1. – С. 200–203.

2. Petrushak V. S. Measurement of the amplitude of periodic signals using the Fibonacci method / V. S. Petrushak // Приборы и методы измерений. – 2018. – Т. 9. № 2. – С. 168–173.

3. Електричні вимірювання. Основи метрології і вимірювальна техніка : підручник для студентів. Том 2 / [Дороговець М., Стадник Б., Мотало В. та ін.]. – Львів : Вид-во НУ "Львівська політехніка", 2005. – 654 с.

4. Специфікація до компонента MBR0520L. ON Semiconductor [Електронний ресурс]. – 2012. – 4 с. Режим доступу : http://www.onsemi.com/pub/Collateral/MBR0520LT1-D.PDF.

5. Метрология и радиоизмерения : учебник для студентов вузов, обучающихся по направлению подготовки дипломированных специалистов "Радиотехника"/ Нефёдов В.И., Хахин В.Н. и др. – М. : Высшая школа, 2003. – 526 с.

6. Специфікація до компонента LT18099. Linear Technology Corporation [Електронний ресурс]. – 2000. – 24 с. – Режим доступу : http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/180910fa.pdf.

References

1. Petrushak, O. M. Osoblyvosti vymiriuvannia amplitudy periodychnykh syhnaliv / O. M. Petrushak, V. S. Petrushak // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2012. – № 1. – S. 200–203.

2. Petrushak V. S. Measurement of the amplitude of periodic signals using the Fibonacci method / V. S. Petrushak // Pryboгы y metodы yzmerenyi. – 2018. – T. 9. № 2. – C. 168–173.

3. Elektrychni vymiriuvannia. Osnovy metrolohii i vymiriuvalna tekhnika : pidruchnyk dlia studentiv. Tom 2 / [Dorozhovets M., Stadnyk B., Motalo V. ta in.]. – Lviv : Vyd-vo NU "Lvivska politekhnika", 2005. – 654 s.

4. Spetsyfikatsiia do komponenta MBR0520L. ON Semiconductor [Elektronnyi resurs]. – 2012. – 4 s. Rezhym dostupu : http://www.onsemi.com/pub/Collateral/MBR0520LT1-D.PDF.

5. Metrologija i radioizmerenija : uchebnik dlja studentov vuzov, obuchajushhihsja po napravleniju podgotovki diplomirovannyh specialistov "Radiotehnika"/ Nefjodov V.I., Hahin V.N. i dr. – M. : Vysshaja shkola, 2003. – 526 s.

6. Spetsyfikatsiia do komponenta LT18099. Linear Technology Corporation [Elektronnyi resurs]. – 2000. – 24 s. – Rezhym dostupu : http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/180910fa.pdf.

Рецензія/Peer review : 06.02.2019 р. Надрукована/Printed :16.2.2019 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Підченко С.К.

DOI 10.31891/2307-5732-2019-269-1-187-**Ошибка! Закладка не определена.**
УДК 006.90.01.39:681.2

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 5. ФИЗИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЭНЕРГИИ ФЕРМИ

В работе рассмотрена сущность магнитополевых эффектов, положенных в основу методов измерения энергии Ферми. металлов, что обогатило наши представления об их эффективности, особенностях использования и воспроизведения. Показано, что практически все известные методы исследований уровня Ферми и поверхности Ферми основаны на облучении металлических образцов электромагнитными волнами микроволнового диапазона и на использовании магнитополевых эффектов квантования энергии электронов, проявляющихся при воздействии на металлические образцы сильных магнитных полей и низких температур. Эти эффекты связаны с поведением, при низких температурах, электронов материала, на который действуют постоянные и переменные высокочастотные магнитные поля с учетом разного числа электронов в единице объема и строении кристаллической решетки этого материала. Показаны существенные различия между эффектами, их преимущества и недостатки. В частности, например, показано, что эффект Шубникова – де Гааза является первым широко используемым и экспериментально наблюдаемым проявлением диамагнитного квантования энергии электронов в твердом теле и, как следствие этого, — осциллирующей зависимости плотности состояний электронов на уровне Ферми от напряженности магнитного поля. Физическая сущность данного эффекта состоит в зависимости проводимости металла от плотности состояний электронов на ферми-поверхности, причем максимумы проводимости наблюдаются при условии совпадения энергии Ферми с очередным экстремумом на зависимости плотности состояний от энергии электронов на n-м уровне Ландау. Работа представляет интерес для метрологов, специалистов, магистров и аспирантов, изучающих магнитополевые эффекты и явления, методы и средства измерения энергии Ферми материалов в макромире.

Ключевые слова: физические эффекты, магнитные поля, электроны, измерение энергии Ферми, магнитополевые измерительные преобразователи.

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 5. THE PHYSICAL EFFECTS USED FOR MEASUREMENT OF ENERGY OF FERMI

In paper *the essence of the* magnetic-field *effects taken as a principle of methods of measurement of energy of Fermi is considered. It has enriched our representations about their efficiency, features of use and reproduction.* It is shown that *practically* all known methods for studying the Fermi level and the Fermi surface are based on the irradiation of metal samples with electromagnetic waves of the microwave range and on the use of the magnetic-field effects of electron energy quantization, which manifest themselves when strong magnetic fields and low temperatures are applied to metal samples. These effects are associated with the behavior, at low temperatures, of the electrons of the material, which is subject to constant and variable high-frequency magnetic fields, taking into account the different number of electrons per unit volume and the structure of the crystal lattice of this material. Significant differences between effects, their advantages and disadvantages are shown. In particular, for example, it was shown that the Shubnikov – de Haas effect is the first widely used and experimentally observed manifestation of diamagnetic quantization of the electron energy in a solid and, as a consequence, the oscillating dependence of the density of electron states at the Fermi level on the magnetic field strength. The physical essence of this effect is the dependence of the conductivity of the metal on the density of electron states on the Fermi surface, and the conductivity maxima are observed under the condition that the Fermi energy coincides with the next extremum on the dependence of the density of states on the electron energy on the n-th Landau level. The paper is of interest to metrologists, specialists, masters and graduate students who study magnetic-field effects and phenomena, methods and means of measuring the Fermi energy of materials in the macrocosm.

Keywords: physical effects, magnetic fields, electrons, Fermi energy measurement, magnetic-field transducers.

Введение. Настоящая статья является дальнейшим развитием магнитополевой (МП) теории измерений (ТИ). Ранее, в работах [1–5], были изложены: философские аспекты теории, перечислены цели и научные направления, которые используются в МП ТИ. Установлены законы, принципы, категории, правила, основные гипотезы, утверждения и определения, используемые в МП ТИ. Перечислены атрибуты МП эффектов. Рассмотрены условия проявления и сущность ряда МП эффектов и явлений. Описано явление переноса энергии и информации сквозь вещество и условия его осуществления. Изложены фундаментальные законы магнетизма и электродинамики, используемые в МП ТИ. Рассмотрены фундаментальные законы, условия и проблемы измерений энергии Ферми. Детально описаны физические процессы взаимодействия импульсного магнитного поля с отрицательно заряженными квазичастицами

материала, из которого выполнена механическая система замкнутого типа (двухконтурный волновод). Особое внимание уделено описанию действия магнитных и электрических сил на отрицательно заряженные квазичастицы. Изложена сущность и приведено несколько определений нового принципа измерений, положенного в основу МП методов измерений (МИ). Приведены определения, сформулированы цели МП измерений, описаны их этапы. Рассмотрены функциональные схемы МП измерительных преобразователей (ИП), подробно описаны их особенности и работа.

В работе [6] дальнейшее развитие и исследование получили плоские вещественные алгебраические кривые шестого порядка — бикольцоиды и кольцоиды, используемые при описании траектории движения отрицательно заряженных квазичастиц внутри механической системе замкнутого типа и совершаемой ими работе на отдельных участках этого пути.

Ниже изложена сущность известных физических эффектов, положенных в основу методов определения энергии Ферми.

Объектом исследований являются магнитополевые эффекты (МПЭ), которые могут быть использованы для измерения энергии Ферми.

Предметом исследований является описание сущности, преимуществ и недостатков существующих МПЭ, используемых для оценки энергии Ферми.

По-прежнему актуальной является задача развития и описания сущности МП МИ энергии Ферми и схемотехнических решений магнитополевых измерителей (МПИ) энергии Ферми.

Результаты исследований. Энергия Ферми является одним из наиболее фундаментальных свойств материалов (металлов, диэлектриков и полупроводников). Вместе с зонной структурой она определяет поверхность Ферми того или иного материала, по которой можно предсказать и другие фундаментальные магнитные и электронные особенности и свойства материалов. Как известно, форма поверхности Ферми определяет ряд свойств и важных характеристик не только металлов, но и любых других материалов. С формой поверхности Ферми тесно связаны кинетические коэффициенты металла, а также его равновесные и оптические свойства [7].

На сегодня наиболее распространенными являются методы определения энергии Ферми и поверхности Ферми, основанные на эффекте Шубникова – де Газа (ШдГ), на эффекте де Гааза – ван Альфена (ГвА) и на эффекте фотоэмиссионной спектроскопии с угловым разрешением (ФЭСсУР или английская транскрипция. ARPES) [8, 9].

1. *Сущность эффекта Шубникова – де Гааза и метода измерений на его основе*

Осцилляции электрического сопротивления (или проводимости) в магнитном поле, обусловленные прохождением дискретных энергетических уровней Ландау через поверхность Ферми называют эффектом Шубникова – де Газа [10-13]. Обнаружен в 1930 году.

Эффект ШдГ является кинетическим эффектом. В отличие от осцилляций термодинамических параметров в магнитном поле, он связан не только с особенностями плотности состояний электронов на уровне Ферми, но и с возникающими с той же периодичностью особенностями вероятности рассеяния электронов.

В твердом теле под действием магнитного поля происходит квантование энергии электронов. В результате квантования квазинепрерывный электронный спектр преобразуется в квазидискретный (рис. 1) [13].

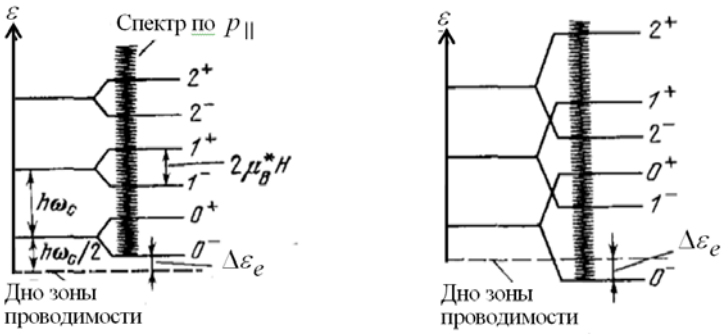


Рис. 1. Графическое изображение энергетических уровней электронов в магнитном поле с учетом спинового расщепления: а) в отсутствие магнитного поля, б) в сильном магнитном поле

На рис. 1, с учетом спинового расщепления, приведено графическое изображение энергетических уровней электронов в отсутствие магнитного поля и при сильных магнитных полях. Дисперсия энергии электронов в отсутствие магнитного поля $\Delta\varepsilon_e \sim (\frac{1}{m_c^e} - \frac{1}{m_s^e})$ (см. рис. 1, а), при наличии магнитного поля $\Delta\varepsilon_e \sim (\frac{1}{m_s^e} - \frac{1}{m_c^e})$ (рис. 1, б). Здесь m_c^e — циклотронная масса, связанная с циклотронной частотой ω_c ($m_c^e = \frac{eB}{\omega_c c}$); m_s^e — спиновая масса. Отметим, что циклотронная масса совпадает с эффективной массой только для квадратичного закона дисперсии, в произвольном случае она может отличаться от эффективной массы электрона.

Для электронов с квадратичным законом дисперсии магнитного поля **H** энергия ε зависит от квантовых чисел n и s и проекции квазиимпульса $p_{||} = (\mathbf{pH})/H$ на направление вектора напряженности **H** магнитного поля [13]:

$$\varepsilon(n,s,p_{\|}) = \hbar\omega_c\left(n+\frac{1}{2}\right)+s\hbar\frac{eH}{2m_s c}+\frac{p_{\|}^2}{2m_{\|}}, \quad (1)$$

где $n = 0, 1, 2, ...$; $s = \pm 1$; $\omega_c = eH/m_s c$ — циклотронная частота; $e\hbar/2cm_s = \mu_B^*$ — эффективный магнетон Бора; $m_c, m_s, m_{\|}$ — циклотронная, спиновая и продольная эффективные массы.

В достаточно сильных магнитных полях и при низких температурах расстояние между соседними уровнями Ландау $\hbar\omega_c$ становится больше теплового размытия ($\sim kT$) границы Ферми. При увеличении напряженности магнитного поля дискретные уровни Ландау, смещаясь вверх по оси энергии, пересекают уровень Ферми. На уровнях Ландау плотность состояний очень велика. В тех случаях, когда какой-нибудь уровень Ландау совпадает с границей Ферми, концентрация электронов на уровне Ферми проходит через максимум. В результате возникают изменения термодинамических и кинетических свойств, характеризующих рассматриваемое вещество. При увеличении магнитного поля периодическое изменение плотности состояний при совпадении уровней Ландау с границей Ферми и является причиной осциллирующего характера магнитосопротиления [13].

Физическая сущность эффекта состоит в том, что проводимость σ металла определяется, в том числе, и плотностью состояний $D(\varepsilon)$ на ферми-поверхности, поскольку

$$\sigma = \frac{1}{3}e^2\left(v^2\tau D(\varepsilon)\right)_{\mu}. \quad (2)$$

Максимумы проводимости наблюдаются при условии совпадения энергии Ферми с очередным экстремумом на зависимости $D(\varepsilon)$ (см. рис 2) [10]:

$$\varepsilon_F = \hbar\omega_c(n+\frac{1}{2}) = \hbar\frac{eB}{mc}(n+\frac{1}{2}). \quad (3)$$

Поэтому периодическое изменение плотности состояний $D(\varepsilon)$ при пересечении уровнем Ландау поверхности Ферми приводит к осцилляции сопротивления [10]. Полезная информация содержится в амплитуде и частоте этих осцилляций.

Как отмечается в [13], для наблюдения эффекта ШдГ необходимо (и достаточно) создать магнитные поля напряженностью десятки килоэрстед. Такие значения напряженности получают с помощью сверхпроводящих соленоидов или охлаждаемых электромагнитов с ферромагнитными сердечниками.

Энергия электронов на n-м уровне Ландау определяется аналитическим выражением [10]

$$E(n,k_z) = \hbar\omega_c(n+\frac{1}{2})+\hbar^2k_z^2/2m \quad (4)$$

где k_z — ось z k-пространства, и имеет минимальное значение, если

$$E_{\min}(n) = \hbar\omega_c(n+\frac{1}{2}) \quad (5)$$

При этом, каждое значение двукратно вырождено по направлению k_z и двукратно вырождено по спину.

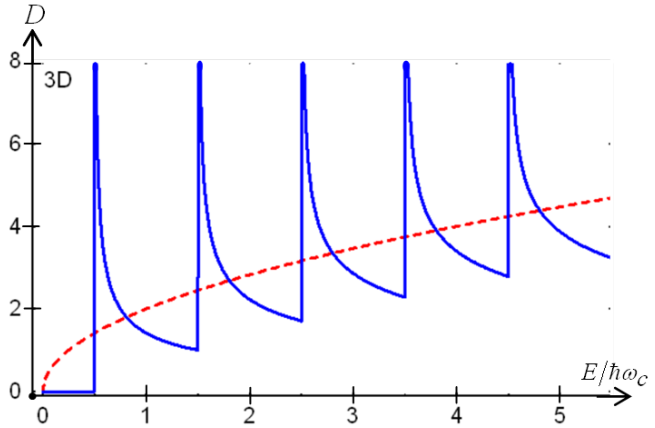


Рис. 2. Схематическое изображение плотности состояний в трёхмерном ферми-газе с учётом квантования уровней Ландау

Рассматривая чисто орбитальное движение электронов, взаимодействием спинового момента с магнитным полем пренебрегаем.

Вклад минимального уровня (5) в плотность состояний определяется при

$$D_n = \frac{V}{(2\pi)^2}\frac{1}{l_B^2}\frac{\sqrt{2m}}{\hbar}\frac{1}{(\varepsilon - \hbar\omega_c(n-\frac{1}{2}))}, \quad (6)$$

где l_B — магнитная длина ($l_B = \sqrt{\hbar c/eB}$),
а полная плотность состояний (см. рис. 2) —

$$D(\varepsilon) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} D_n(\varepsilon). \quad (7)$$

Магнитная длина l_B задаёт характерную длину (масштаб $x_0 = l_B^2 k_y$) на которую электрон удаляется от ведущего центра. Магнитная длина — величина того же порядка, что и радиус r циклотронной орбиты для первого уровня Ландау ($r = k_F\,\hbar c/eB$, где k_F — направление групповой скорости [9]), При значении индукции магнитного поля равном 10 Тл $l_B = 0.81$ мкм. Квант магнитного потока, пронизывающий циклотронную орбиту, равен $\Phi_0 = \pi/l_B^2\,B = \pi\hbar c/e = 2{,}05\cdot 10^{-7}$ Э·см^2.

Таким образом, вместо монотонной зависимости плотности состояний от энергии в ней появляются периодические острые максимумы (см. рис. 2). На рис. 2 $D(E)$ — плотность состояний; $E/\hbar\omega_c$ — приведенная (относительная) энергия; пунктирная кривая — зависимость плотности состояний в отсутствие магнитного поля. Поскольку многие свойства металла зависят от плотности состояний на уровне Ферми, то можно предположить, что эти свойства будут резко меняться в зависимости от того попадает ли положение уровня ферми на пик плотности состояний или на один из минимумов.

Следовательно, экспериментально измеренная зависимость $\sigma(B)$ должна иметь регулярные равноотстоящие максимумы, будучи построенной как функция напряженности магнитного поля, обратного по значению $1/B$. Осцилляции в координатах обратного по значению поля традиционно характеризуются величиной $F = \varepsilon_F \cdot m_c/\hbar e$ («частотой»), измеряемой в единицах напряжённости магнитного поля (Тл). При наличии нескольких циклотронных масс будет наблюдаться несколько «частот» и «биения» на графике σ(1/B) [10]. Пример таких данных, измеренных на соединении из класса «тяжёлых фермионов» показан на рис. 3.

На рис. 3 (левая шкала) приведены графики зависимости проводимости (сопротивления) от обратного поля при температуре 35мК. Представлены результаты измерений для двух образцов (сплошная и пунктирная линии). На рис. 3 (правая шкала) приведена осциллирующая часть (составляющая проводимости), которая выделенная на фоне монотонного спада проводимости (роста сопротивления) образцов в магнитном поле.

Эффект ШдГ оказался первым экспериментально наблюдаемым проявлением диамагнитного квантования энергии электронов в твердом теле и, как следствие этого, —осцил-лирующей зависимости электронной плотности состояний на уровне Ферми от напряженности магнитного поля [14].

Эффект ШдГ получил широкое применение и стал одним из основных методов исследования энергетического спектра электронов и зонной структуры в металлах, полуметаллах и полупроводниках, и важным методом исследования перестройки спектра под действием высоких давлений, сильных одноосных деформаций и электрических полей, легирования и т. д. [13].

В настоящее время построена только приближенная теория эффекта ШвГ [10].

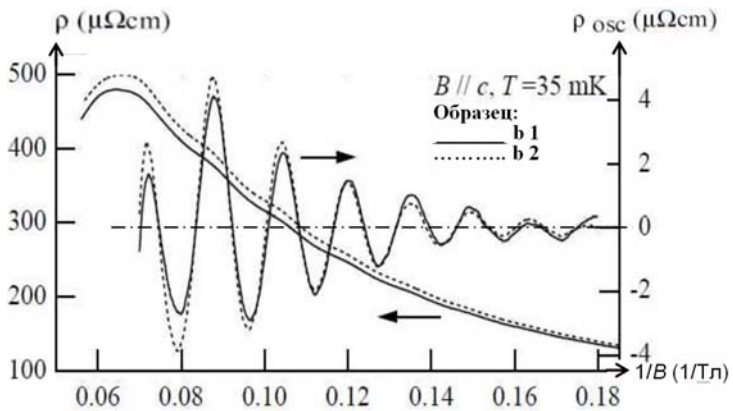


Рис. 3. Пример наблюдения шубниковских осцилляций проводимости в соединении CeNiSn

Наиболее корректно она разработана для осцилляций магнитосопротивления поперек образца.

2. *Сущность эффекта де Гааза-ван Альфена и метода измерения на его основе*

Согласно [15, 16], эффект де Гааза – ван Альфена — это эффект, обусловленный квантованием

движения электронов в магнитном поле. При температурах близких к абсолютному нулю, когда тепловое движение электронов останавливается, и при отсутствии внешнего магнитного поля квазисвободные электроны в металлах в пространстве импульсов занимают сферу (поверхность Ферми). При действии внешнего магнитного поля, например на металл, движение квазисвободных электронов в нем становится квантованным в плоскости, нормальной к оси поля, и отсутствует в направлении поля. В результате, под воздействием внешнего магнитного поля сфера Ферми превращается в ряд концентрических цилиндров (рис. 4, [12]), оси которых параллельны внешнему магнитному полю, а поперечные сечения равны $\pi eH\hbar / c$, $3\pi eH\hbar / c$ [15]. При возрастании напряженности H внешнего магнитного поля цилиндры расширяются и высота наружного цилиндра уменьшается до нуля. Затем его место занимает следующий цилиндр и так далее. С ростом напряженности магнитного поля происходит расширение цилиндров Ландау, и они один за одним пересекают объем, созданный энергетической поверхностью Ферми.

Для наблюдения осцилляций, необходимо обеспечить выполнение следующих условий [10]; $\omega_c \tau \gg 1$, $\hbar\omega_c \gg k_B T$, $E_F > \hbar\omega_c$, где τ — время релаксации, ω_c — циклотронная частота; k_B — коэффициент Больцмана; E_F — энергия Ферми.

Средняя энергия электронов периодически зависит от напряженности магнитного поля, что вызывает периодическое изменение осцилляции) магнитной восприимчивости $\chi = d^2\overline{E}/dH^2$

Таким образом, эффект де Гааза — ван Альфена является чисто квантовым и возникает из-за квантования электронных орбит в магнитном поле. Он проявляется в осцилляциях намагниченности M как функции магнитного поля B. Эффект наблюдается в чистых образцах, при низких температурах и в сильных магнитных полях.

Сущность метода измерения состоит в измерении частоты осцилляций магнитного момента, как функции напряженности магнитного поля [8]. Поскольку концентрические цилиндры расположены очень близко друг к другу (рис. 4), то магнитное поле, налагаемое на образец при эксперименте, должно быть довольно однородным и часто очень большим по значению напряженности.

При осуществлении измерений образец материала должен находиться внутри соленоида, с которого снимается выходной сигнал. Тогда частоту осциллирующей компоненты магнитного поля, возни-кающей из-за осцилляции магнитной восприимчивости χ_m, можно непосредственно зафиксировать и измерить [17].

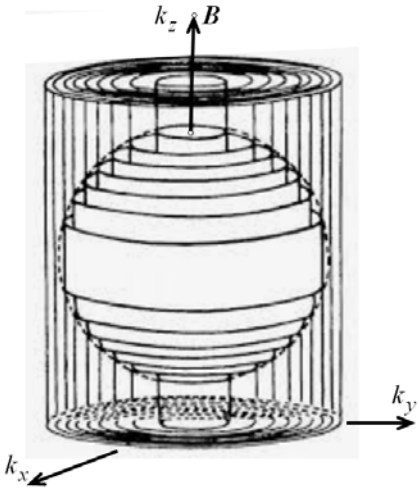


Рис. 4. Сферическая поверхность Ферми и цилиндры Ландау с осями, параллельными направлению магнитного поля

Известно, что намагниченность определяется как магнитный момент единицы объема вещества, т.е. $\mathbf{M} = \mathbf{p}_m / V$, где М — вектор намагниченности; $\mathbf{p}_m$ — вектор магнитного момента; V — объём. В случае неоднородной среды намагниченность выражается как $\mathbf{M} = d\mathbf{p}_m / d\mathbf{V}$, где $d\mathbf{p}_m$ — сум-марный магнитный момент молекул в объеме dV, и является функцией координат.

Магнитные свойства вещества характеризуются средним магнитным моментом единицы объема – вектором намагниченности $\mathbf{M} = \sum_{i=1}^{N} \mathbf{p}_{mi} \Big/ \mathbf{V}$ А/м .

Связь между **M** и напряженностью магнитного поля **H** в диамагнитных и парамагнитных материалах обычно линейна (при небольших значениях напряженности магнитного поля) $\mathbf{M} = \chi_m \mathbf{H}$, где χ_m — магнитная восприимчивость. В системе СИ магнитная индукция для изотропных материалов определяется через намагниченность и магнитную восприимчивость как $\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M}) = \mu_0(1 + \chi_m)\mathbf{H} = \mu\mu_0\mathbf{H}$, где μ — относительная магнитная проницаемость вещества. μ_0 — магнитная постоянная,

Аналитическое выражение функции, описывающей вклад эффекта де Гааза – ван Альфена в осцилляции свободной энергии впервые предложено английским физиком-теоретиком Р. Пайерлсом [18]. Оно имеет вид:

$$F_{HA} = 2\pi V \frac{(2m)^{3/2}}{(2\pi\hbar)^3} \sum_{l=1}^{\infty} \frac{1}{\mathrm{sh}(\pi^2 l k_B T / \mu_B B)} \cos\left(\frac{1}{B}\frac{\pi l E_F}{\mu_B} - \frac{\pi}{4}\right) \tag{8}$$

или, через намагниченность,

$$F_{HA} = 2\pi V \frac{(2m)^{3/2}}{(2\pi\hbar)^3} \sum_{l=1}^{\infty} \mathrm{csch}\left(\pi^2 l k_B T / \mu_B \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M})\right) \cos\left(\frac{1}{\mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M})}\frac{\pi l E_F}{\mu_B} - \frac{\pi}{4}\right), \tag{9}$$

где V — объем тела, m — масса электрона, T — температура исследуемого металла, k_B — постоянная

Больцмана, $\hbar$ — приведенная постоянная Планка, μ_B — магнетон Бора ($\mu_0 = e\hbar/2m_e$) или приведенная магнитная проницаемость (μ=–$N\mu_B$, где N — общее число электронов), E_F — энергия Ферми, B — индукция магнитного поля, l — магнитная длина пути .

С ростом l знаменатель функции (8) (или (9)) растет очень быстро. Поэтому существенен только первый член этой функции. На наличие осцилляций указывает сдвинутая на четверть периода функция cos, зависящая от $1/B$. Амплитуда
осцилляций, определяемая знаменателем, экспоненциально убывает, когда отношение $\mu_B B / k_B T$ становится малым [18].

Сравнительная легкость наблюдения эффектов ШдГ и дГвА в сочетании с высокой информативностью о параметрах электронной системы привели к тому, что эти эффекты получили широкое применение. Методы исследований энергетического спектра электронов в металлах, полуметаллах и полупроводниках на основе этих эффектов стали одними из основных.

Квантовые осцилляционные эффекты

К середине XX века были обнаружены осцилляции магнитного момента (эффект дГвА), термоэдс, холловской ЭДС, теплоемкости, теплопроводности, квазиклассического коэффициента поглощения длинноволнового звука и других термодинамических и кинетических свойств и характеристик металла [14]. Все эти эффекты были объединены под общим названием «квантовые осцилляционные эффекты». Они наблюдаются при выполнении одних и тех же, указанных выше, условий, т.е. при $\omega_c \tau \gg 1$, $\hbar\omega_c \gg k_B T$ и $E_F > \hbar\omega_c$. Общая теория квантовых осцилляционных эффектов была развита И. М. Лифшицем с сотрудниками в 1955 –1971 гг.

Рассмотрим сущность некоторых квантовых осцилляционных эффектов.

3. *Магнитоакустический эффект и метод измерения энергии Ферми на его основе*

Магнитоакустический эффект заключается в том, что под действием магнитного ноля происходит изменение фазовой скорости и поглощения звука в металле [19].

Относительное изменение фазовой скорости определяется по относительному изменению резонансной частоты исследуемого образца. Изменение поглощения обнаруживается при измерении логарифмического декремента затухания, определяемого по ширине резонансной кривой. Последняя снимается для каждого образца в отдельности при одном и том же значении напряженности магнитного поля. Начальное затухание из рассмотрения можно исключить, если использовать отношение θ_B / θ_0 — где θ_B и θ_0 — логарифмический декремент затухания при и без наложении на колеблющийся образец постоянного магнитного поля.

Исследования [19] подтвердили квадратичную зависимость относительного логарифмического декремента затухания θ_B / θ_0 и сдвига резонансной частоты Δf от значения индукции магнитного поля. Для испытания образцов необходимо выбирать достаточно большое значение магнитной индукции, — $B = 0{,}1 - 1(3)$ Тл и более.

Известно [7], что акустическая волна генерирует электрическое поле с теми же частотой, волновым вектором и поляризацией. Благодаря электромагнитной волне, электроны металла могут взаимодействовать со звуковой волной, усиливая или ослабляя ее.

Как отмечалось выше, квантовые осцилляционные эффекты наблюдаются при выполнении таких условий, как $\omega_c \tau \gg 1$, $\hbar\omega_c \gg kT$ и $E_F > \hbar\omega_c$, Если электрон в магнитном поле в промежутке между столкновениями может совершать большое количество оборотов, т.е. $\omega_c \tau \gg 1$, где τ – среднее время между столкновениями (при сильных магнитных полях, низких температурах и очень чистом монокристалле), то зависимость затухания звука от его длины волны имеет осцилляционный характер и может содержать информацию о поперечных (по отношению к **B**) сечениях поверхности Ферми.

Как правило, осцилляции обусловлены условием резонанса, поглощением или усилением акустической волны, состоящим в кратности или полукратности отношения диаметра l_c орбиты электрона вдоль распространения акустической волны, т.е. в направлении, перпендикулярном направлению вектора магнитной индукции, и длиной волны λ.

В условиях слабой связи диаметра орбиты электрона с длиной акустической волны λ, которая описывается соотношением $l_c = n\lambda$, поглощение и усиление компенсируются в положительном и отрицательном полупериодах волны. В условиях сильной связи, т.е. при $l_c = (n + 1/2)\lambda$, это не происходит. Изменяя направление распространение звуковой волны и вектора индукции магнитного поля (с тем, чтобы могли проявиться различные экстремальные диаметры) иногда удается определить форму поверхности Ферми [7].

4. Аномальный скин-эффект

Скин-эффект — это явление, связанное с неравномерным распределением переменного тока по сечению проводника. У поверхности металлического образца концентрация электронов максимальна и резко уменьшается по глубине проникновения в *e* раз [20] .

Характер скин-эффекта зависит от относительных значений трех характерных размеров: толщина

слоя поглощения (δ_0) (проникновения) электромагнитного поля, длины свободного пробега электронов (l) и от отношения средней скорости электронов металла к частоте электромагнитного поля (v_F/ω).

Нормальному скин-эффекту соответствует область наиболее низких частот, при которых длина свободного пробега электронов проводимости намного меньше глубина проникновения электромагнитного поля, т.е. $l \ll \delta_0$, и намного меньше отношения скорости к частоте, т.е. $l \ll v_F/\omega$ (или $\omega\tau \ll 1$, т.к. время свободного пробега $\tau \sim l/v_F$). [21]. В металле излучение поглощается в слое толщиной [21]

$$\delta_0 = c/\sqrt{2\pi\sigma\omega}\,, \tag{10}$$

где $\sigma_{\text{пр}}$ — проводимость образца.

Так называемая классическая глубина (толщина) скин-слоя (10) уменьшается с увеличением частоты поля.

При нормальном скин-эффекте имеет место линейная зависимость плотности тока **J** от напряженности магнитного поля **E**, т.е. $J = \sigma_{\text{пр}} E$.

В случае $\delta_0 \sim l$ эффект является аномальным и требуется и описывается более сложной теорией,

Предельно аномальным скин-эффект — это явление, при котором длина свободного пробега электронов проводимости намного больше глубины проникновения электромагнитного поля (или толщины слоя поглощения) ($l \gg \delta_0$) и намного больше отношения скорости к частоте ($l \gg v_F/\omega$). При таком режиме неприменимо представление об экспоненциальном затухании поля с глубиной. Глубина проникновения и коэффициент отражения в этом случае определяются некоторыми характеристиками поверхности Ферми, — формой и особенностями поверхности, которые зависят от ориентации поверхности Ферми относительно реальной поверхности кристалла [7].

Известно [22], что при своём движении электроны непрерывно теряют энергию на преодоление омического сопротивления проводника. В результате чего происходит выделение джоулевой теплоты. Даже при комнатной температуре длина свободного пробега электрона для металлов становится сопоставимой с толщиной скин-слоя, что говорит об аномальном характере скин-эффекта. Ситуация усугубляется при очень низких температурах, когда проводимость металла сильно повышается. Это приводит к увеличению длины свободного пробега и к уменьшению толщина скин-слоя. В таких условиях механизм, приводящий к образованию скин-эффекта, уже не действует. Эффективная толщина слоя, в котором сосредоточен ток, изменяется по закону [21]

$$\delta_{\text{ан}} \sim \left(c^2 \mathrm{h}^3 / \omega e^2 p_F^3\right)^{1/3}, \tag{11}$$

где p_F — поперечные размеры цилиндрической ферми-поверхности.

Как видно из (11), при увеличении частоты эффективная толщина слоя продолжает уменьшаться, но медленнее, чем при нормальном скин-эффекте. Поскольку она зависит от размеров цилиндрической ферми-поверхности .

Сравнивая (10) и (11), отметим, что при одном и том же значении частоты глубина проникновения δ_0 при нормальном скин-эффекте убывает пропорционально $\omega^{1/2}$, а при предельно аномальном — пропорцио-нально $\omega^{1/3}$. Следовательно, при одном и том же значении частоты ω

$$\delta_{\text{ан}}^3 \sim \delta_0^2 l\,. \tag{12}$$

Следовательно, метод аномального скин-эффекта, основан на исследовании затухания микроволнового поля при проникновении его в металл. При исследованиях аномальных скин-эффектов следует учитывать, что результаты измерений весьма сильно зависят от состояния поверхности металлического образца.

5. Циклотронный резонанс. Циклотронная масса

Явление избирательного поглощения или отражения электромагнитных волн проводниками, помещёнными в постоянное магнитное поле, на частотах равных или кратных циклотронной частоте носителей заряда, называется циклотронным резонансом [21].

В постоянном магнитном поле **H** заряженные частицы движутся по спиралям, оси которых направлены перпендикулярно этому полю.

Циклотронная частота (гирочастота или гиромагнитная частота) — это частота обращения заряженной частицы в постоянном магнитном поле **H** по орбите, лежащей в плоскости, перпендикулярной магнитному полю [23].

Для произвольной поверхности Ферми, например, в металлах, циклотронная частота определяется согласно аналитического выражения

$$\omega_c = \frac{2\pi e B}{\hbar^2} \frac{dE}{dS_k(E,k)}\,, \tag{13}$$

где S_k — площадь поверхности Ферми k - пространства; B — индукция магнитного поля; e — элементарный заряд; E — энергия электронов,

При комнатной температуре циклотронный резонанс наблюдается только в сверхсильных магнитных полях [24].

Метод циклотронного резонанса, так же как и метод аномального скин-эффекта, основан на исследовании затухания микроволнового поля при проникновении его в металл.

В эксперименте определяется не геометрия поверхности Ферми, а эффективная «циклотронная масса»

$$m* = \frac{\hbar^2}{2\pi}\frac{\partial S(E,k_z)}{\partial E}, \tag{14}$$

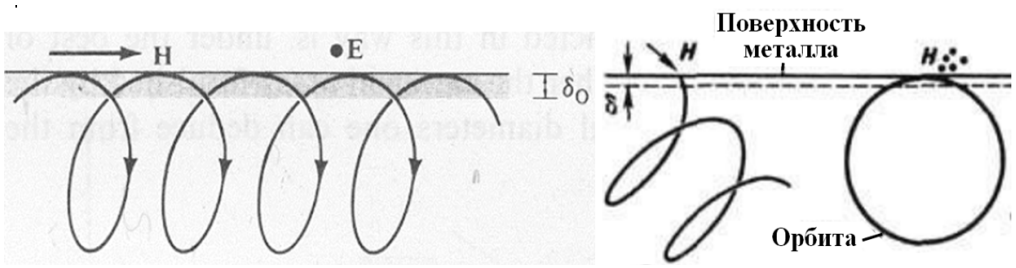
где k_z — ось z k – пространства, в котором расположена орбита электрона с энергией E в постоянном магнитном поле $\mathbf{H}$, пропорциональная энергетическому градиенту площади поперечного сечения поверхности Ферми $\partial S/\partial E$ [7].

Следует отметить, что эффективная масса электрона или дырки, возникает при движении носителей в магнитном поле. В общем случае она не совпадает с эффективной массой носителей, поскольку поверхность Ферми может быть анизотропной и эффективная масса принимает вид тензора. Если ферми-поверхность устроена сложно, то циклотронная масса окажется разной для разных сечений ферми-поверхности плоскостями, перпендикулярными к магнитному полю [25, 26]. Каждой циклотронной массе соответствует свой период вращения по орбите. В этой связи при проведении экспериментов исследуются наиболее весомые состояния, в которых много сечений ферми-поверхности имеет близкие циклотронные массы.

Циклотронную эффективную массу измеряют с помощью метода циклотронного резонанса или метода, основанного на эффекте Шубникова – де Гааза. По значениям циклотронной массы можно восстановить форму поверхности Ферми в твёрдом теле [25].

6. Эффект Азбеля – Канера

В 1956 году Азбель М.Я. и Канер Э.А. предложили направить постоянное магнитное поле напряженностью $\mathbf{H}$ параллельно поверхности металла. В этом случае, модель траектории движения электрона в однородном постоянном магнитном поле $\mathbf{H}$, при действии переменного электрического поля[1] параллельного магнитному, т.е. при $\mathbf{E} \parallel \mathbf{H}$, примет вид, приведенный на рис. 5, а. Рис 5, б, в представляет траекторию движения электрона в том же магнитном поле $\mathbf{H}$ (б) и орбиту электрона (в) при действии переменного электрического поля под углом к магнитному, В этом случае циклотронный резонанс отсутствует.



а б в

Рис. 5. Траектория движения электронов согласно эффекту Азбеля – Канера

Электрон, многократно входящий в скин-слой δ_0 в фазе с высокочастотным электромагнитным полем, проявляет свойство резонансного поглощения энергии этого поля при условии, что период T_e обращения электрона равен или кратен периоду T_E колебаний электрического поля, т.е. $T_e = nT_E$, где n — целое число периодов.

Азбель и Канер установили, что зависимость комплексного поверхностного импеданса от магнитной индукции определяется выражением [27]

$$Z(B) = Z_0\left[1-\exp\left(-2\pi/\omega t_m\right)\exp\left(-2\pi i\omega_c/\omega\right)\right]^{1/3}, \tag{15}$$

где Z_0 — поверхностный импеданс на частоте циклотронного резонанса; t_m — время, в течение которого электрон может пройти значительную часть своей магнитной орбиты до того, как он будет рассеян; ω_c — циклотронная частота; ω — радиочастота; B — магнитная индукция (входит в аналитическое выражение для ω_c).

При таком резонансе имеет место резонансное уменьшение активной R и реактивной X

[1] точнее — высокочастотного электромагнитного поля

составляющих полного поверхностного импеданса[1] металлов

$$Z(\omega) = R + iX = E_0(\omega) \Big/ \int_0^\infty J(x)dx \qquad (16)$$

в высокочастотном электромагнитном и постоянном магнитном полях. Он обусловливает резонансное уменьшение поглощения электромагнитной энергии заданной частоты металлом при определенных значениях $Z(\omega) = Z_{\omega_c}$.

Результаты экспериментального наблюдения резонанса Азбеля-Канера в кристалле чистой меди при двух температурах приведены на рис.. 6.

Кривая для более высокой температуры сглажена из-за возросшего теплового рассеяния движущихся по циклотронной орбит электронов.

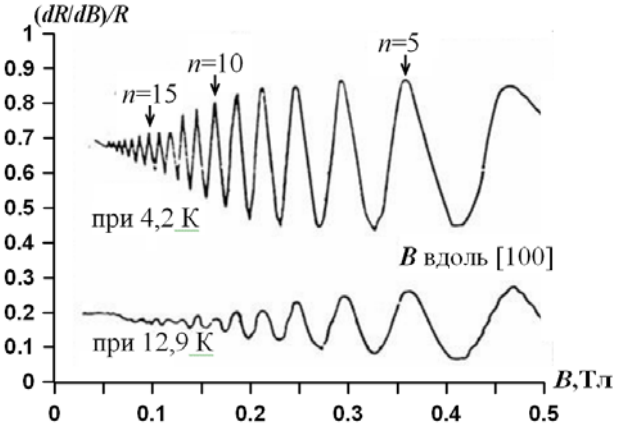


Рис. 6. Результаты экспериментального наблюдения резонанса Азбеля – Канера в кристалле чистой меди при двух значениях температур

Типовое значение циклотронной частоты составляет $\omega_c = eH/m_c^* c \approx 10^{11}$ rad/Тл, значение радиуса орбиты — $r_c \approx 10^2 (hc/eH)^{1/2} \approx 10^2 \lambda_B = 2.56 \cdot 10^4$ А/Тл, а глубина проникно-вения осциллирующего поля в СВЧ диапазоне частот равна (для меди) $\delta_0 = c/(2p\pi\omega s)^{1/2} \approx \approx 0{,}1$ мм [29].

Для полноты представления, в качестве примера на рис. 7 и рис. 8 для образца меди приведены поверхность Ферми и часть ферми-поверхности. Последняя представлена в виде повторяющихся зон. Поверхность Ферми для меди (рис. 7) формируется электронами, расположенными в заполненной наполовину 4s-зоне.

Для энергетических состояний на границе зоны эффективная масса электрона положительна в направлении k_b и k_c, но отрицательна в направлении k_a, перпендикулярном плоскости зонной границы.

Часть ферми-поверхности, имеющая форму такого типа, называют «шейкой» (рис. 8). В магнитном поле электрон можно заставить прецессировать вокруг «шеечной орбиты» постоянной энергии [27] .На «поясной орбите» имеет место максимизация циклотронного периода, а на «шеечной орбите» его минимизация по сравнению с соседними орбитами (рис. 8).

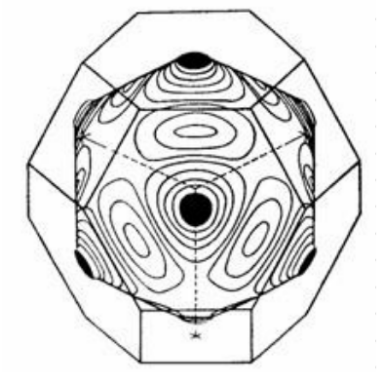


Рис. 7. Поверхность Ферми для меди

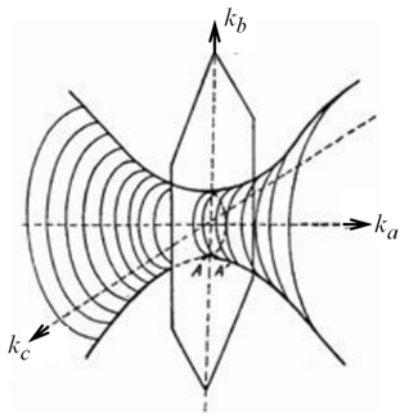


Рис. 8. Изображение части ферми-поверхности

[1] Поверхностный импеданс Z определяется как отношение комплексной величины $E_0(\omega)$, описывающей переменное электрическое поле с частотой ω на поверхности, к проинтегрированной комплексной плотности тока $J(x)$ [28].

Весьма важное значение имеют экстремальные орбиты. Это связано с тем, что электроны, прецессирующие по орбитам, лежащим на несферической поверхности Ферми, совершают в данном магнитном поле множеством периодов вращения. Однако, из-за различия фаз, вклады электронов с не экстремальных орбит взаимно компенсируются. Основной вклад дает экстремальная область, для которой обращается в нуль первая производная от периода (от частоты) по компоненте k_a, направленной вдоль магнитного поля (рис. 8). Эта область ответственна за формирование сигнала высокого уровня, находящегося в фазе [27].

Исследование циклотронного резонанса в металлах имеет большое значение для теории металлов, поскольку позволяет определить форму и размеры ферми-поверхности, времена свободного пробега носителей, электрон-фононное взаимодействие[1] и др. [30], Он получил название циклотронным резонансом Азбеля – Канера, предсказанного ими теоретически. Экспериментально циклотронный резонанс наблюдался при исследованиях *Sn*, *PЬ* и других металлов.

7. Эффект Гантмахера

Эффект Гантмахера[2] состоит в резонансном возрастании интенсивности проходящего через тонкую металлическую пластину УВЧ-излучения (мегагерцовый диапазон) в параллельном поверхности пластины постоянном магнитном поле [31].

В случаях, когда толщина металлической пластины h больше глубины проникновения или толщины скин-слоя δ_0, но меньше длины l свободного пробега электронов, т.е. при $\delta_0 < h < l$, электрическое поле будет воздействовать на электроны, находящиеся в пределах скин-слоя у поверхности образца, вызывая УВЧ-излучение энергии. При условии $\delta_0 < h < l$ в магнитном поле, возможны орбиты электронов, простирающиеся от скин-слоя от передней до задней поверхностей пластинки (рис. 9). При таких орбитах электроны, находящиеся в пределах скин-слоя, способны производить на задней поверхности пластины электрический ток, вызванный приложенным снаружи на ее переднюю поверхность электрическим УВЧ-полем. В результате на задней стороне пластинки генерируется электромагнитное излучение.

На рис. 9 приведены графические построения, поясняющие движение электронов в тонкой металлической пластине, помещенной в постоянное магнитное поле **B** и в электромагнитное поле **E** радиочастотного диапазона, которое направлено параллельно поверхности этой пластины.

Эффект Гантмахера — аномальная зависимость поверхностного импеданса металлических пластин от значения постоянного магнитного поля (см. (16)). Он наблюдается при тех значениях напряженности поля, при которых один из характерных размеров электронных траекторий внутри металла становится сравнимым с толщиной металлической пластины.

Для наблюдения эффекта Гантмахера металлическая пластина помещается в постоянное магнитное поле и в электромагнитное поле радиочастотного диапазона. Затем определяется зависимость поглощаемой в металлической пластине мощности, пропорциональной действительной части поверхностного импеданса пластины или зависимость глубины проникновения электромагнитного поля, пропорционального мнимой части импеданса, от значения постоянного внешнего магнитного поля.

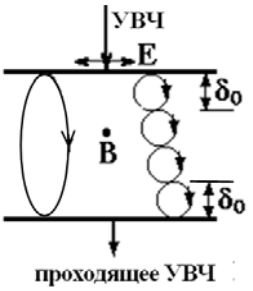


Рис. 9. Орбиты электронов в полях B и E

С целью увеличения чувствительности часто используется определение и регистрация производных в зависимости от значения магнитного поля, в частности, например, производной $\partial X/\partial E$ как функции от B (рис. 10). На рис. 10 приведены результаты наблюдений, полученные Гантмахером для трех значений толщины металлической пластины ($d = 0{,}05$ мм, $d = 0{,}25$ мм и $d = 0{,}63$ мм) при значениях магнитной индукции $0{,}1$ кЭ … $1{,}6$ кЭ.

Таким образом, существует достаточное количество физических принципов измерений энергии Ферми, в основу которых положены разные физические эффекты и явления [31].

Недостатки существующих методов измерения энергии Ферми

Общим недостатком известных методов измерения энергии Ферми является: использование образцов металлов малых размеров, необходимость создания магнитных полей с большим значением магнитной индукции, а также использование низких температур. Известные методы не предназначены для исследований свойств слабопроводящих и непроводящих материалов. По-нашему мнению существенным недостатком существующих методов измерения энергии Ферми является отсутствие уравнений связи между физическими величинами, отсутствие метрологического обеспечения наблюдаемых эффектов, методов и

[1] Взаимодействие между двумя подсистемами квазичастиц в твёрдых телах, а именно, носителями заряда и тепловыми колебаниями кристаллической решётки твёрдых тел — фононами. Зависит от структуры кристалла, числа носителей заряда, характера зонного спектра и особенностей колебаний кристаллической решётки [32]. *Фонон* , как искусственно введенная квазичастица, представляет собой квант колебательного движения атомов кристалла.

[2] радиочастотный размерный эффект

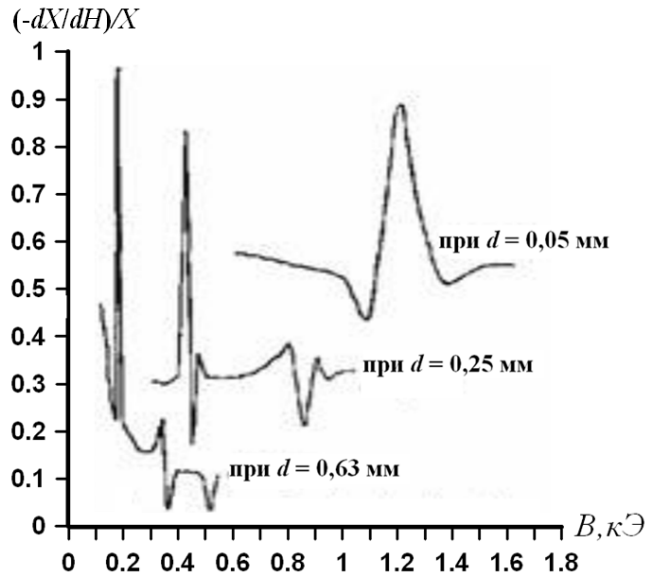


Рис. 10. Резонансные пики для металлической пластины разной толщины

средств измерений на их основе Для многих методов не возможно получить повторяемость результатов измерений, их высокую точность и достоверность.

В большинстве случаев результаты измерений представляются физиками-экспериментаторами не корректно, — в виде горизонтальной шкалы входных значений магнитной индукции и не проградуированной вертикальной шкалы значений “результатов” измерений. Другими словами, приводится только качественная картина наблюдаемого эффекта, но не количественная. Создается впечатление, что физики, открывшие описанные выше магнитополевые эффекты, не знакомы с основами метрологии и измерительной техники. Они не различают такие понятия, как «формула» (математическое понятие), «уравнение величин» и «уравнение числовых значений» (метрологические). Не допускается применение уравнений смешанного вида, когда наряду с физическими величинами используются числа. Все это снижает научный уровень и эффективность использования известных магнитополевых эффектов в металлофизике и в металловедении. К сожалению, этими недостатками страдают и многие современные ученые-экспериментаторы, которые не работают в.тесном контакте с метрологами. Без создания метода измерения на основе того или иного магнитополевого эффекта, без вывода соответствующего уравнения измерений, экспериментальные данные не могут быть признаны достоверными и поэтому не находят широкого применения в технике.

И, наконец, настораживает тот факт, что полученные физиками магнитополеввые эффекты не опираются на фундаментальные законы сохранения энергии (электромагнитной и механической), законы симметрии и др.

Приведенные выше резонансные кривые «подправлены» автором настоящей статьи. На соответствующих рисунках показано, как корректно должны представляться результаты наблюдений одиночных импульсных и резонансных кривых.

Выводы. Проанализированы магнитополевые эффекты, используемые для определения энергии Ферми металлов, что обогатило наши представления об их эффективности, особенностях использования и воспроизведения.

Практически все известные методы исследований уровня Ферми и поверхности Ферми основаны на облучении металлических образцов электромагнитными волнами микроволнового диапазона и на использовании магнитополевых эффектов квантования энергии электронов, проявляющихся при воздействии на металлические образцы сильных магнитных полей и низких температур.

Эффект ШдГ является первым широко используемым и экспериментально наблюдаемым проявлением диамагнитного квантования энергии электронов в твердом теле и, как следствие этого, — осциллирующей зависимости плотности состояний электронов на уровне Ферми от напряженности магнитного поля.

Физическая сущность эффекта ШдГ состоит в зависимости проводимости металла от плотности состояний электронов на ферми-поверхности, причем максимумы проводимости наблюдаются при условии совпадения энергии Ферми

с очередным экстремумом на зависимости плотности состояний от энергии электронов на n-м уровне Ландау.

Причиной осциллирующего характера магнетосопротивления является то, что с увеличением напряженности магнитного поля дискретные уровни Ландау, смещаясь вверх по оси энергии, периодически пересекают уровень Ферми. Полезная информация о свойствах металла содержится в амплитуде и частоте этих осцилляций.

Эффект де Гааза – ван Альфона обусловлен квантованием движения электронов в магнитном поле. при температурах близких к абсолютному нулю, когда тепловое движение электронов останавливается, но при действии внешнего магнитного поля на металл движение квазисвободных электронов в нем становится квантованным в плоскости, нормальной к оси поля, и отсутствует в направлении поля. Эффект проявляется в осцилляциях намагниченности как функции индукции магнитного поля. Для наблюдения осцилляций, необходимо обеспечить выполнение следующих условий: $\omega_c\tau \gg 1$, $\hbar\omega_c \gg k_B T$, $E_F > \hbar\omega_c$, где τ — время релаксации, ω_c — циклотронная частота; k_B — коэффициент Больцмана; E_F — энергия Ферми.

Недостатком эффекта де Гааза — ван Альфена является его проявление только в чистых металлических образцах, при низких температурах и сильных магнитных полях.

Особенностью магнитоакустического эффекта является изменение фазовой скорости и поглощения

звука в металлическом образце под действием постоянного магнитного ноля. Имеет место квадратичная зависимость относительного логарифмического декремента затухания θ_B / θ_0 и сдвига резонансной частоты Δf от индукции магнитного поля. Изменение фазовой скорости определяется по относительному изменению резонансной частоты исследуемого образца. Изменение поглощения обнаруживается при измерении логарифмического декремента затухания, определяемого по ширине резонансной кривой. Эта кривая снимается для каждого образца в отдельности при одном и том же значении напряженности магнитного поля.

Явление, при котором длина свободного пробега электронов проводимости намного больше глубины проникновения электромагнитного поля в металл и намного больше отношения скорости к частоте, т.е. $l \gg \delta_0$ и $l \gg v_F / \omega$, называется предельно аномальным скин-эффектом. В этом эффекте глубина проникновения и коэффициент отражения определяются некоторыми характеристиками поверхности Ферми, — формой и особенностями поверхности, которые зависят от ориентации поверхности Ферми относительно реальной поверхности кристалла. Именно форма и особенности поверхности Ферми объясняют такие свойства металлов, как проводимость электричества и тепла, поведение металлов в магнитном поле),

Циклотронная частота — это частота обращения заряженной частицы в постоянном магнитном поле по орбите, лежащей в плоскости, перпендикулярной магнитному полю. Она пропорциональна напряженности магнитного поля, действующего на металлический образец, и обратно пропорциональна эффективной массе электронов. Последняя, в свою очередь, зависит от энергии Ферми. Измерив частоту циклотронного резонанса, при заданном значении напряженности магнитного поля, можно определить и эффективную массу электронов, по значению которой судят об энергии Ферми.

Эффект Азбеля-Канера основан на резонансном уменьшении активной R и реактивной X составляющих полного поверхностного импеданса металлического образца, помещенного в однородное постоянное магнитное поле $\mathbf{H}$, при действии на образец переменного электрического поля $\mathbf{E}$ параллельного магнитному, т.е. $\mathbf{E} \parallel \mathbf{H}$. В этом случае происходит многократное вхождение электрона, движущегося по круговой траектории, в скин-слой в фазе с высокочастотным электромагнитным полем, и резонансное поглощение им энергии этого поля, но при условии, что период обращения электрона равен или кратен периоду колебаний электрического поля,

Эффект Гантмахера — это явление резонансного возрастания интенсивности УВЧ-излучения, проходящего через тонкую металлическую пластину, размещенную в однородном постоянном магнитном поле, параллельном поверхности этой пластины. Особенностью этого эффекта является то, что он проявляется: 1) если толщина металлической пластины h больше толщины скин-слоя δ_0, но меньше длины l свободного пробега электронов, т.е. при $\delta_0 < h < l$ и 2) при тех значениях напряженности магнитного поля, при которых один из характерных размеров круговых электронных траекторий внутри металла становится сравнимым с толщиной металлической пластины.

При $\delta_0 < h < l$ электрическое поле воздействует на электроны, находящиеся в пределах скин-слоя у поверхности образца, а магнитное поля обеспечивает переносит электронов на заднюю сторону пластины, вызывая УВЧ-излучение энергии;

Литература

1. Кондратов В.Т. Фундаментальная метрология. Магнитополевая теория измерений с использованием явления переноса энергии и информации сквозь материал или вещество. Часть 1. Философские аспекты теории / В.Т. Кондратов // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2018. – № 4. – С. 222–233.
2. Кондратов В.Т. Фундаментальная метрология. Магнитополевая теория измерений с использованием явления переноса энергии и информации сквозь материал или вещество. Часть 2. Атрибуты магнитополевых эффектов / В.Т. Кондратов // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2018. – № 1. – С. 7–14.
3. Кондратов В.Т. Фундаментальная метрология. Магнитополевая теория измерений с использованием явления переноса энергии и информации сквозь материал или вещество. Часть 2.1. Условия проявления магнитополевых эффектов и явлений / В.Т. Кондратов // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2018. – №1. – С. 15–31.
4. Кондратов В.Т. Фундаментальная метрология. Магнитополевая теория измерений с использованием явления переноса энергии и информации сквозь материал или вещество. Часть 3. Явление переноса, используемые фундаментальные законы, условия и проблемы измерений / В.Т. Кондратов // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2018. – № 5. – С. 84–100.
5. 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.
6. Кондратов В.Т. Фундаментальная метрология. Бикльцоилы и кольцоилы — плоские вещественные алгебраические кривые шестого порядка / В.Т. Кондратов // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2019. – № 1. – С. 167–183.
7. Экспериментальные методы исследования поверхности Ферми [Электронный ресурс]. – Режим

доступа : http://nuclphys.sinp.msu.ru/solidst/physmet5.htm.

8. Measurement of the Fermi energy by the angular correlation of -radiation form annihilation of electron-positron pairs. URL: https://www.ph.tum.de/academics/org/labs/fopra/docs/abstract-86.en.pdf.

9. Методы изучения структуры и колебаний кристаллической решётки. методы изучения ферми-поверхностей [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.kapitza.ras.ru/~glazkov/students/2017/07-spectra-and-fermi-mar24.pdf

10. Электроны в магнитном поле (лекция 8) [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.kapitza.ras.ru/~ glazkov/teaching/2015-08.pdf

11. Эффект Шубникова – де Гааза [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://docplayer.ru/53554927-Effekt-shubnikova-de-gaaza-479.html.

12. Влияние примеси железа в HgSe на эффект Шубникова – де Гааза [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://elib.spbstu. ru/dl/2/4178.pdf/download/4178.pdf.

13. Брандт Н.Б. Эффект Шубникова – де Гааза и его применение для исследования энергетического спектра металлов, полуметаллов и полупроводников [Электронный ресурс] / Брандт Н.Б., Чудинов С.Ж. – Режим доступа : https://ufn.ru/ufn82/ ufn82_7/Russian/r827f.pdf.

14. Брилинская Е.С. Магнитные свойства полупроводниковых наноструктур, сильнолегированных бором [Электронный ресурс] : автореферат дисс. работы на соиск. уч. степени к.ф-м.н. / Брилинская Е.С. – С.-Петербург, 2011. – Режим доступа : http://elib.spbstu.ru/dl/2276.pdf/download/2276.pdf.

15. Эффект де Гааза – ван Альфена [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D1%84% D1%84%D0%B5%D0%BA%D1%82_%D0%B4%D0%B5_%D0%A5%D0%B0%D0%B0%D0%B7%D0%B0_%E2%80%94_%D0%B2%D0%B0%D0%BD_%D0%90%D0%BB%D1%8C%D1%84%D0%B5%D0%BD%D0%B0.

16. Эффект де Гааза — ван Альфена в наноструктурах фторида кадмия [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://journals. ioffe.ru/articles/viewPDF/7602.

17. Энциклопедия по машиностроению XXL [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://mash-xxl.info/info/188432/.

18. Пайерлс Р. Сюрпризы в теоретической физике [Электронный ресурс] / Пайерлс Р. – М. : Наука, 1988. – 176 с. – (Серия "Библиотека теоретической физики", вып. 6). – Режим доступа : http://lib.sernam.ru /book stp.php?id=25.

19. Зворыкина Р. А. Некоторые результаты исследования магнитоакустического эффекта в сплавах на основе алюминия [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.akzh.ru/pdf/1966_3_306-309.pdf

20. Энциклопедия по машиностроению XXL. – С. 190 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://mash-xxlinfo/page/060176 241170138188204243103233025233250103131142/

21. Аномальный скин-эффект // Научная библиотека. – С. 428 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://scask.ru/book_t_phis 10.php?id=102 .

22. Скин-эффект [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%BA%D0%B8%D0%BD-%D1%8D%D1%84%D1%84%D0%B5%D0%BA%D1%82#%D0%90%D0%BD%D0%BE%D0%BC%D0%B0%D0 %BB%D1%8C%D0%BD%D1%8B%D0%B9_%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%BD-%D1%8D%D1%84%D1%84 %D0%B5%D0%BA%D1%82 .

23. Циклотронная частота [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A6%D0%B8%D0%BA% D0%BB%D0%BE%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D1%87%D0%B0%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%82%D0%B0 .

24. Циклотронный резонанс [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A6%D0%B8%D0%BA %D0%BB%D0%BE%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D1%8B%D0%B9_%D1%80%D0%B5%D0%B7%D0%BE%D0%BD%D0%B0%D0%BD%D1%81.

25. Циклотронная масса [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A6%D0%B8%D0%BA%D0% BB%D0%BE%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D0%BC%D0%B0%D1%81%D1%81%D0%B0.

26. Циклотронный резонанс в металле [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.kapitza.ras.ru/~glazkov/teaching/2015-08.pdf.

27. Циклотронный резонанс [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://referatplus.ru/fizika/1_fizika_0316.php

28. Энциклопедия по машиностронеию XXL. – С. 751 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://mash-xxl.info/page/139118 138193090219114073027195194209166100172047/.

29. 29.Measuring FS using the de Haas-van Alphen effect. URL: https://phy.ntnu.edu.tw/~changmc/Teach/ SS/SSG_note/grad_chap14.pdf.

30. Физическая энциклопедия. Циклотронный резонанс [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://dic.academic.ru/ dic.nsf/enc_physics/524/%D0%A6%D0%98%D0%9A%D0%9B%D0%9E%D0%A2%D0%A0%D0%9E%D0%9D%D0%9D%D0%AB%D0%99.

31. Гантмахера эффект. Радиочастотный размерный эффект [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.heuristic.su/ effects/catalog/est/byId/description/179/index.html.

32. Электрон-фононное взаимодействие [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://femto.com.ua/articles/part_2/4715.html.

References

1. Kondratov V.T. Fundamental'naja metrologija. Magnitopolevaja teorija izmerenij s ispol'zovaniem javlenija perenosa jenergii i informacii skvoz' material ili veshhestvo. Chast' 1. Filosofskie aspekty teorii / V.T. Kondratov // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2018. – № 4. – S. 222–233.

2. Kondratov V.T. Fundamental'naja metrologija. Magnitopolevaja teorija izmerenij s ispol'zovaniem javlenija perenosa jenergii i informacii skvoz' material ili veshhestvo. Chast' 2. Atributy magnitopolevyh jeffektov / V.T. Kondratov // Vimirjuval'na ta obchisljuval'na tehnika v tehnologichnih procesah. – 2018. – № 1. – S. 7–14.

3. Kondratov V.T. Fundamental'naja metrologija. Magnitopolevaja teorija izmerenij s ispol'zovaniem javlenija perenosa jenergii i informacii skvoz' material ili veshhestvo. Chast' 2.1. Uslovija projavlenija magnitopolevyh jeffektov i javlenij / V.T. Kondratov // Vimirjuval'na ta obchisljuval'na tehnika v tehnologichnih procesah. – 2018. – №1. – S. 15–31.

4. Kondratov V.T. Fundamental'naja metrologija. Magnitopolevaja teorija izmerenij s ispol'zovaniem javlenija perenosa jenergii i informacii skvoz' material ili veshhestvo. Chast' 3. Javlenie perenosa, ispol'zuemye fundamental'nye zakony, uslovija i problemy izmerenij / V.T. Kondratov // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2018. – № 5. – S. 84–100.

5. Kondratov V.T. Fundamental'naja metrologija. Magnitopolevaja teorija izmerenij s ispol'zovaniem javlenija perenosa jenergii i informacii skvoz' material ili veshhestvo. Chast' 4. Magnitopolevye metody i izmeritel'nye preobrazovateli / V.T. Kondratov // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2018. – № 6. – S. 183–197.

6. Kondratov V.T. Fundamental'naja metrologija. Bikl'coily i kol'coily — ploskie veshhestvennye algebraicheskie krivye shestogo porjadka / V.T. Kondratov // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2019. – № 1. – S. 167–183.

7. Jeksperimental'nye metody issledovanija poverhnosti Fermi [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : http://nuclphys.sinp.msu.ru/solidst/physmet5.htm.

8. Measurement of the Fermi energy by the angular correlation of -radiation form annihilation of electron-positron pairs. URL: https://www.ph.tum.de/academics/org/labs/fopra/docs/abstract-86.en.pdf.

9. Metody izuchenija struktury i kolebanij kristallicheskoj reshjotki. metody izuchenija fermi-poverhnostej [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : http://www.kapitza.ras.ru/~glazkov/students/2017/07-spectra-and-fermi-mar24.pdf

10. Jelektrony v magnitnom pole (lekcija 8) [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : http://www.kapitza.ras.ru/~glazkov/teaching/2015-08.pdf

11. Jeffekt Shubnikova – de Gaaza [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : https://docplayer.ru/53554927-Effekt-shubnikova-de-gaaza-479.html.

12. Vlijanie primesi zheleza v HgSe na jeffekt Shubnikova – de Gaaza [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : http://elib.spbstu.ru/dl/2/4178.pdf/download/4178.pdf.

13. Brandt N.B. Jeffekt Shubnikova – de Gaaza i ego primenenie dlja issledovanija jenergeticheskogo spektra metallov, polumetallov i poluprovodnikov [Jelektronnyj resurs] / Brandt N.B., Chudinov S.Zh. – Rezhim dostupa : https://ufn.ru/ufn82/ ufn82_7/Russian/r827f.pdf.

14. Brilinskaja E.S. Magnitnye svojstva poluprovodnikovyh nanostruktur, sil'nolegirovannyh borom [Jelektronnyj resurs] : avtoreferat diss. raboty na soisk. uch. stepeni k.f-m.n. / Brilinskaja E.S. – S.-Peterburg, 2011. – Rezhim dostupa : http://elib.spbstu.ru/dl/2276.pdf/download/2276.pdf.

15. Jeffekt de Gaaza – van Al'fena [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D1%84%D1%84%D0%B5%D0%BA%D1%82_%D0%B4%D0%B5_%D0%A5%D0%B0%D0%B0%D0%B7%D0%B0_%E2%80%94_%D0%B2%D0%B0%D0%BD_%D0%90%D0%BB%D1%8C%D1%84%D0%B5%D0%BD%D0%B0.

16. Jeffekt de Gaaza — van Al'fena v nanostrukturah ftorida kadmija [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : http://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/7602.

17. Jenciklopedija po mashinostroeniju XXL [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : http://mash-xxl.info/info/188432/.

18. Pajerls R. Sjurprizy v teoreticheskoj fizike [Jelektronnyj resurs] / Pajerls R. – M. : Nauka, 1988. – 176 s. – (Serija "Biblioteka teoreticheskoj fiziki", vyp. 6). – Rezhim dostupa : http://lib.sernam.ru /book stp.php?id=25.

19. Zvorykina R. A. Nekotorye rezul'taty issledovanija magnitoakusticheskogo jeffekta v splavah na osnove aljuminija [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : http://www.akzh.ru/pdf/1966_3_306-309.pdf

20. Jenciklopedija po mashinostroeniju XXL. – C. 190 [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : http://mash-xxlinfo/page/060176241170138188204243103233025233250103131142/

21. Anomal'nyj skinjeffekt // Nauchnaja biblioteka. – C. 428 [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : http://scask.ru/book_t_phis10.php?id=102 .

22. Skin-jeffekt [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%BA%D0%B8%D0%BD-%D1%8D%D1%84%D1%84%D0%B5%D0%BA%D1%82#%D0%90%D0%BD%D0%BE%D0%BC%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D1%8B%D0%B9_%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%BD-%D1%8D%D1%84%D1%84%D0%B5%D0%BA%D1%82 .

23. Ciklotronnaja chastota [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A6%D0%B8%D0%BA%D0%BB%D0%BE%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D1%87%D0%B0%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%82%D0%B0 .

24. Ciklotronnyj rezonans [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A6%D0%B8%D0%BA%D0%BB%D0%BE%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D1%8B%D0%B9_%D1%80%D0%B5%D0%B7%D0%BE%D0%BD%D0%B0%D0%BD%D1%81.

25. Ciklotronnaja macsa [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A6%D0%B8%D0%BA%D0%BB%D0%BE%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D0%BC%D0%B0%D1%81%D1%81%D0%B0.

26. Ciklotronnyj rezonans v metalle [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : http://www.kapitza.ras.ru/~glazkov/teaching/2015-08.pdf.

27. Ciklotronnyj rezonans [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : http://referatplus.ru/fizika/1_fizika_0316.php

28. Jenciklopedija po mashinostroneiju XXL. – C. 751 [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : http://mash-xxl.info/page/139118138193090219114073027195194209166100172047/.

29. 29.Measuring FS using the de Haas-van Alphen effect. URL: https://phy.ntnu.edu.tw/~changmc/Teach/SS/SSG_note/grad_chap14.pdf.

30. Fizicheskaja jenciklopedija. Ciklotronnyj rezonans [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : https://dic.academic.ru/dic.nsf/enc_physics/524/%D0%A6%D0%98%D0%9A%D0%9B%D0%9E%D0%A2%D0%A0%D0%9E%D0%9D%D0%9D%D0%AB%D0%99.

31. Gantmahera jeffekt. Radiochastotnyj razmernyj jeffekt [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : http://www.heuristic.su/effects/catalog/est/byId/description/179/index.html.

32. Jelektron-fononnoe vzaimodejstvie [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : http://femto.com.ua/articles/part_2/4715.html.

Рецензія/Peer review : 21.1.2019 р. Надрукована/Printed :15.2.2019 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Троцишин І.В.

DOI 10.31891/2307-5732-2019-269-1-201-210
УДК 621.396.81

Н.А. ОДЕГОВ, А.И. ГУЗУН
Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова

ЗАВИСИМОСТЬ ДЛИТЕЛЬНОСТИ И ФОРМЫ ОПТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ОТ НЕРАВНОМЕРНОСТИ КОЭФФИЦИЕНТА ЗАТУХАНИЯ

В рамках общей проблемы повышения эффективности волоконно-оптических систем передачи рассматривается задача оценки влияния неравномерности коэффициента затухания на форму и длительность оптического сигнала. Дается общая модель совместного влияния фактора дисперсии и фактора неравномерности. Приводится методика обработки экспериментальных данных. В качестве исходных данных принята теоретическая модель зависимости коэффициента затухания от длины волны. Данная зависимость пересчитывается в зависимость коэффициента передачи от циклической и угловой частоты. Показано, что в локальных областях данные зависимости с большой точностью аппроксимируются полиномами не выше третьего порядка. Для получения количественных оценок рассматривается узкочастотный канал шириной порядка 100 ГГц. В качестве моделей оптических сигналов рассматривается импульс Найквиста частного вида. При этом спектральная плотность полагается вида приподнятого косинуса с малым коэффициентом скругления. Другая рассматриваемая модель – оптический сигнал в форме гауссова импульса. Для двух этих случаев показано, что за счет фактора неравномерности сигнал удлиняется по мере распространения вдоль оптического волокна. Порядок удлинения составляет единиц пикосекунд на километр в расчете на один нанометр полосы излучения лазера. Данные значения несколько меньше, чем значения дисперсионных эффектов. Вместе с тем, при расчетах регенерационных участков перспективных волоконно-оптических систем передачи эффект неравномерности также следует учитывать. Для решения задач численными методами разработано программное обеспечение в среде программирования Scilab. Получены количественные оценки параметров моделей зависимости коэффициента передачи от частоты для окон прозрачности 850, 1330 и 1550 нм.

***Ключевые слова**: дисперсия, затухание, оптический сигнал, спектр, преобразование Фурье, гауссов импульс, импульс Найквиста.*

N.A. ODEGOV, A.I. GUZUN
Odessa National O.S. Popov Academy of Telecommunications

DEPENDENCE OF DURATION AND FORM OF OPTICAL SIGNALS ON THE UNEQUAL ATTENUATION

Within the framework of the general problem of increasing the efficiency of fiber-optic transmission systems, the problem of estimating the influence of the non-uniformity of the attenuation coefficient on the shape and duration of an optical signal is considered. A general model of the joint influence of the dispersion factor and the unevenness factor is given. The method of processing experimental data is given. A theoretical model of the dependence of the attenuation coefficient on the wavelength was adopted as the initial data. This dependence is recalculated in the dependence of the transmission coefficient on the cyclic and angular frequency. It is shown that in local regions these dependences are approximated with great accuracy by polynomials of no higher than the third order. To obtain quantitative estimates, a narrow-frequency channel with a width of about 100 GHz is considered. As models of optical signals, the Nyquist pulse of a particular type is considered. In this case, the spectral density is assumed to be a kind of raised cosine with a small rounding coefficient. Another model under consideration is an optical signal in the form of a Gaussian pulse. For these two cases, it is shown that, due to the factor of non-uniformity, the signal is lengthened as it propagates along the optical fiber. The order of elongation is in units of picoseconds per kilometer per one nanometer of the laser emission band. These values are somewhat smaller than the values of dispersion effects. However, in calculating the regeneration areas of promising fiber-optic transmission systems, the effect of irregularity should also be taken into account. To solve problems by numerical methods, software was developed in the Scilab programming environment. Quantitative estimates of the parameters of the model of the dependence of the transfer coefficient on the frequency for the transparency windows of 850, 1330 and 1550 nm were obtained.

***Keywords:** dispersion, attenuation, optical signal, spectrum, Fourier transform, Gaussian impulse, Nyquist impulse.*

Введение

Известны оценки [1] прироста трафика в телекоммуникационных сетях порядка 30% в год. На основании этих данных сделан вывод, что наиболее уязвимыми с точки зрения пропускной способности могут оказаться каналы передачи данных между узлами агрегации трафика [2]. Для волоконно-оптических систем передачи (ВОСП) региональных и национальных операторов типичными являются каналы с длиной регенерационных участков (РУ) порядка 100–300 км. Известные методики инженерных расчетов [3] длины РУ требуют расчета ограничений по затуханию и по дисперсии. При этом расчет по затуханию учитывает только уменьшение мощности сигнала по мере его распространения вдоль оптического волокна (ОВ) вследствие различных энергетических потерь различной природы, включая потери на разъемных и неразъемных соединениях. Расчеты ограничений по дисперсии учитывают эффекты увеличения длительности оптического импульса. В том и другом вариантах расчетов используются паспортные данные оптического кабеля [4]. Данная методика позволяет с достаточной уверенностью рассчитывать длины РУ для существующих ВОСП.

Для перспективных ВОСП возможно использование сигнальных методов уплотнения [5]. При этом существенным оказывается учет искажений оптического сигнала за счет различных факторов. В работе [6] сделан вывод, что неравномерность коэффициента затухания по частоте (далее – ***фактор неравномерности***) может приводить к эффектам, аналогичным влиянию дисперсии. В частности, под

воздействием фактора неравномерности оптический импульс также может удлиняться по мере распространения вдоль ОВ.

Целью данной статьи является уточнение моделей фактора неравномерности, а также получение количественных оценок степени его влияния на длительность и форму оптического сигнала.

1. Совместная модель оператора дисперсии и фактора неравномерности

В условиях, близких к практическим ситуациям, можно принять систему допущений:

– полагаем, что сигнал на входе ОВ имеет приблизительно круговую поляризацию;

– сигнал на входе в ОВ относительно слаб, что позволяет считать нелинейные эффекты типа четырехволнового смешения [7] или фазовой самомодуляции [8] пренебрежимо малыми;

– профиль ОВ по коэффициенту преломления строго ступенчатый;

– оптическое волокно функционирует в одномодовом режиме;

– материал сердцевины ОВ можно считать изотропной средой;

– модели преобразований рассматриваются применительно к узкополосному каналу ВОСП с шириной полосы порядка 100 ГГц.

В этих предположениях можно ограничиться [2] рассмотрением формальной модели дисперсионной эволюции низкочастотной составляющей (огибающей) оптического сигнала в форме:

$$U(t,z)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}G_0(\omega)\exp\left(j\omega t-jz\sum_{m=2}^{M}\frac{1}{m!}k_0^{[m]}\omega^m\right)d\omega, \quad (1)$$

где $U(t,z)$ – огибающая сигнала на расстоянии z от точки ввода в ОВ; $G_0(\omega)$ – спектральная плотность сигнала в момент ввода в ОВ; ω – девиация частоты (порядка $\pm 2\pi\cdot 50\ ГГц$) относительно несущей ω_0 (порядка $2\pi\cdot 160...2\pi\cdot 375\ ТГц$); $k_0^{[m]}$ – значение производной порядка m волнового числа в малой окрестности несущей частоты ω_0.

В формуле (1) для дисперсионного коэффициента примем обозначение:

$$\varphi(\omega,z)=-\sum_{m=2}^{M}\frac{1}{m!}k_0^{[m]}\omega^m, \quad (2)$$

тогда выражение для огибающей запишется в более компактном виде:

$$U(t,z)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}G_0(\omega)\mathrm{e}^{jz\varphi(\omega)}\mathrm{e}^{j\omega t}\,d\omega. \quad (3)$$

Выражение для огибающей сигнала (3) с учетом затухания в ОВ нуждается в уточнении. Если принять коэффициент затухания приблизительно равномерным, то сигнал на выходе ОВ можно представить в виде:

$$u(t,z)=\eta(z)U(t,z)=\sqrt{\frac{P_{out}(z)}{P_{inp}(z=0)}}U(t,z). \quad (4)$$

где η – линейный коэффициент передачи (величина, обратная линейному коэффициенту затухания); $P_{out}(z)$ – мощность сигнала на расстоянии z от точки ввода в ОВ; $P_{inp}(z=0)$ – мощность сигнала в точке ввода в ОВ. Традиционно паспортизируется, табулируется и отображается графически величина (или функция) затухания в логарифмическом масштабе (логарифмический коэффициент затухания, или, короче – коэффициент затухания):

$$\alpha[дБ/км]=20\lg\sqrt{\frac{P_{inp}(z=0)}{P_{out}(z=1км)}}=10\lg\left(\frac{P_{inp}(z=0)}{P_{out}(z=1км)}\right)=-10\lg\eta^2(z=1км). \quad (5)$$

В различных источниках (например, [4, 9, 10]) дана теория поглощения энергии в ОВ, а также результирующие графики функции (5) в зависимости от длины волны. В данной работе в качестве такого графика будем использовать выразительную иллюстрацию [11], которую цитируем на рис. 1.

Зависимость, представленная на рис. 1 имеет довольно гладкий характер. Это позволяет в малых окрестностях значений аргумента λ (длина волны) представлять функции $\alpha(\lambda)$ и $\eta(\lambda)$ в виде разложений в ряд Тейлора. Иначе говоря, данные функции можно представлять в виде кусочно-полиномиальных аппроксимаций.

Решение задач на классе моделей вида (1) требует пересчета значений $\eta(\lambda)$ в функции, где аргументом является частота. При этом преобразования аргумента $f=c/\lambda$ или $\omega=c/2\pi\lambda$ (где c – скорость света в вакууме; f – циклическая частота; ω – угловая частота) также не имеют особых точек. То есть, зависимости коэффициента затухания и коэффициента передачи от частоты также можно представлять в виде кусочно-полиномиальных аппроксимаций.

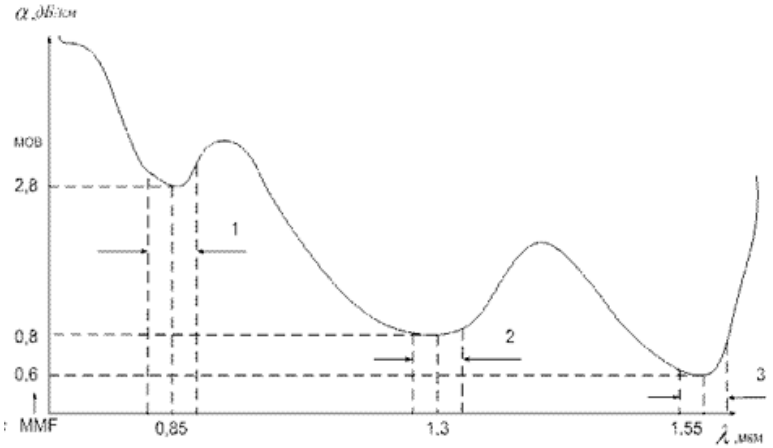


Рис. 1. Зависимость затухания в оптическом волокне от длины волны света

С учетом зависимости распределения мощности сигнала в частотной области, параметры в формуле (5) следует рассматривать как функции:

$$P_{inp}(\omega, z=0) = G_0^2(\omega); \quad P_{out}(\omega, z) = G^2(\omega, z) \Rightarrow G^2(\omega, z) = \eta^2(\omega, z) G_0^2(\omega), \qquad (6)$$

где $G^2(\omega, z)$ – квадрат спектральной мощности (энергетический спектр) сигнала на расстоянии z от точки ввода. Можно показать, что форма функции $G^2(\omega, z)$ не зависит от дисперсионного коэффициента в формуле (1). В то же время, спектральная плотность $G(\omega, z)$ будет зависеть от комплексного коэффициента $\mathrm{e}^{jz\varphi(\omega)}$. Тогда из выражений (4) и (6) получим промежуточное выражение для оператора преобразования сигнала в ОВ:

$$u(t, z) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \eta(\omega, z) G_0(\omega) \mathrm{e}^{jz\varphi(\omega)} \mathrm{e}^{-j\omega t}\, d\omega. \qquad (7)$$

Линейный коэффициент передачи $\eta(\omega, z)$ в формуле (7) представим в экспоненциальной форме: $\eta(\omega, z) = \exp(\psi(\omega, z)) \Rightarrow \psi(\omega, z) = \ln \eta(\omega, z)$. С учетом зависимости (5) можно выполнить цепочку преобразований:

$$\lg \eta = \lg e \ln \eta \approx 0{,}4343 \ln \eta \Rightarrow \ln \eta = (0{,}4343)^{-1} \lg \eta \Rightarrow \lg \eta = -(8{,}646)^{-1} \alpha. \qquad (8)$$

В формуле (5) коэффициент затухания α имеет смысл погонной величины (в расчете на 1 км длины линии, что показано на рис.1). Тогда из зависимости (8) можно получить следующую формулу для логарифмического коэффициента передачи по затуханию (ЛКП):

$$\psi(\omega, z) = z\psi(\omega) = z\beta(\omega) = -\frac{z}{8{,}646} \alpha(\omega, z = 1км), \qquad (9)$$

где $\beta(\omega)$ – погонный (в расчете на 1 км длины линии) ЛКП.

С учетом гладкости аппроксимируемых функций по аналогии с выражением (2) для дисперсионного коэффициента, функцию $\beta(\omega)$ представим в виде полиномиального представления в окрестности некоторой несущей частоты:

$$\beta(\omega, M) = \beta_0 + \beta_1 \omega + \ldots + \beta_M \omega^M, \quad \beta_m = -\frac{1}{8{,}646 \cdot m!} \frac{d\alpha(\omega, z = 1км)}{d\omega}\Big|_{\omega=\omega_0}, \qquad (10)$$

где ω – девиация относительно несущей частоты ω_0.

Из выражений (7) и (9) следует ***общая модель*** преобразований сигнала в ОВ при выполнении ранее сделанных предположений:

$$u(t, z) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_0(\omega) \mathrm{e}^{z[\psi(\omega) + j\varphi(\omega)]} \mathrm{e}^{-j\omega t}\, d\omega, \qquad (11)$$

где коэффициент $\mathrm{e}^{z\psi(\omega)}$ моделирует фактор неравномерности по затуханию, а коэффициент $\mathrm{e}^{jz\varphi(\omega)}$ – эффект дисперсионной эволюции. Из выражения (11) следует, что достаточно общей моделью преобразования спектральной плотности в ОВ является выражение для комплексного частотного коэффициента передачи (КЧКП):

$$H(z, \omega) = \mathrm{e}^{z[\psi(\omega) + j\varphi(\omega)]}. \qquad (12)$$

Соответственно, выражение для спектральной плотности на расстоянии z от точки ввода в ОВ:

$$G(\omega, z) = H(\omega, z) G_0(\omega) = G_0(\omega)\, \mathrm{e}^{z[\psi(\omega) + j\varphi(\omega)]}. \quad (13)$$

Из выражения (12) следует, что модель комплексного коэффициента передачи во временной области (как импульсная характеристика некоторого фильтра [12]) определяется:

$$h(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} H(\omega, z)\, \mathrm{e}^{j\omega t}\, d\omega = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \mathrm{e}^{z[\psi(\omega) + j\varphi(\omega)]} \mathrm{e}^{j\omega t}\, d\omega, \quad (14)$$

тогда во временной области огибающая сигнала на выходе ОВ будет определена выражением:

$$u(t, z) = \int_{-\infty}^{\tau} U_0(t)\, h(\tau - t) dt, \quad (15)$$

где $U_0(t)$ – огибающая сигнала в момент ввода в ОВ.

Анализ зависимостей (13–15) показывает, что оператор преобразования оптического сигнала в ОВ является нестационарным по длине линии z, а также имеет комплексный характер. Иначе говоря, фазовый спектр сигнала изменяется по мере его распространения вдоль ОВ.

Для детального анализа зависимостей (13–15) надо задавать конкретный вид сигнала в момент его ввода в ОВ или конкретный вид начальной спектральной плотности. В то же время, можно рассмотреть оператор преобразования начальной длительности сигнала. Данное параметрическое решение является принципиально важным в смысле определения ограничений скорости передачи данных в ВОСП.

Используя известную зависимость между производной спектральной плотности $G'(\omega)$ и эффективной длительностью сигнала T^2 [12] в рассматриваемом случае получим выражение:

$$T^2(z) = \frac{1}{2\pi E_z} \int_{-\infty}^{\infty} [G'(\omega, z)]^2 d\omega, \quad E_z = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G(\omega, z)^2 d\omega, \quad (16)$$

где E_z – энергия сигнала на расстоянии z от точки ввода. Здесь и далее операция возведения в квадрат понимается как операция умножения величины на комплексно сопряженную с ней величину. Опуская в функциях (16) аргумент и обозначив $G(\omega, z) = G_z$, получим с учетом выражения (13):

$$G_z' = \mathrm{e}^{z(\psi + j\varphi)} \left[G_0' + (\psi + j\varphi) G_0 \right]. \quad (17)$$

Далее примем, что спектральная мощность в момент ввода в ОВ является вещественной функцией. Тогда из выражения (17) после выполнения тождественных преобразований получим:

$$|G_z'|^2 = \mathrm{e}^{2z\psi} \left[G_0'^2 + 2\psi' G_0 G_0' + (\psi'^2 + \varphi'^2) G_0^2 \right]. \quad (18)$$

Выражение (18) позволяет представить эффективную длительность сигнала (16) в виде суммы трех интегралов:

$$T^2(z) = \frac{1}{2\pi E_z} (I_1 + I_2 + I_3), \quad E_z = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \mathrm{e}^{2z\psi} G_0^2 d\omega, \quad (19)$$

где

$$I_1 = \int_{-\infty}^{\infty} \mathrm{e}^{2z\psi} G_0'^2\, d\omega, \quad I_2 = 2 \int_{-\infty}^{\infty} \mathrm{e}^{2z\psi} z\psi' G_0 G_0' d\omega, \quad I_3 = \int_{-\infty}^{\infty} \mathrm{e}^{2z\psi} z^2 (\psi'^2 + \varphi'^2) G_0^2 d\omega. \quad (20)$$

Проанализируем полученные выражения. Компонент суммы (19), определяемый интегралом I_1 после очевидных сокращений будет:

$$T_1^2(z) = \int_{-\infty}^{\infty} \mathrm{e}^{2z\psi} G_0'^2\, d\omega \cdot \left(\int_{-\infty}^{\infty} \mathrm{e}^{2z\psi} G_0^2 d\omega \right)^{-1}$$

Если принять $z = 0$ или $\psi = const$, то данный компонент суммы даст значение эффективной длительности сигнала T_0^2 в момент ввода в ОВ. Полагая функцию $\mathrm{e}^{2z\psi}$ достаточно гладкой и применяя теорему интегрального исчисления о среднем, будем далее полагать, что $T_1^2(z) \approx T_0^2$. Тогда приращение эффективной длительности сигнала на расстоянии z от точки ввода будет определяться компонентами суммы (19), определяемыми только интегралами I_2 и I_3:

$$\Delta T^2(z) = T^2(z) - T_0^2 = \frac{1}{2\pi E_z}(I_2 + I_3). \qquad (21)$$

Под знаком интеграла I_3 находится неотрицательная функция. Данный интеграл обращается в ноль только в том случае, когда одновременно отсутствуют фактор неравномерности и фактор дисперсии, что практически невыполнимо. Интеграл I_2 существенно зависит от характера подынтегральных функций. Вообще говоря, обусловленный им компонент суммы (19) может иметь отрицательное значение. То есть, данная составляющая может вызывать некоторое уменьшение начальной длительности импульса. Более точные оценки можно получить лишь для конкретного вида подынтегральных функций. Для получения необходимых зависимостей выполним обработку значений коэффициента затухания.

2. Методика обработки экспериментальных данных

Реальное решение задачи требует выполнения натурных измерений коэффициента затухания. При этом в рабочем диапазоне длин волн (примерно от 0,6 до 1,8 мкм), как показывают предварительные расчеты, следует выполнять измерения с шагом не более 10 нм.

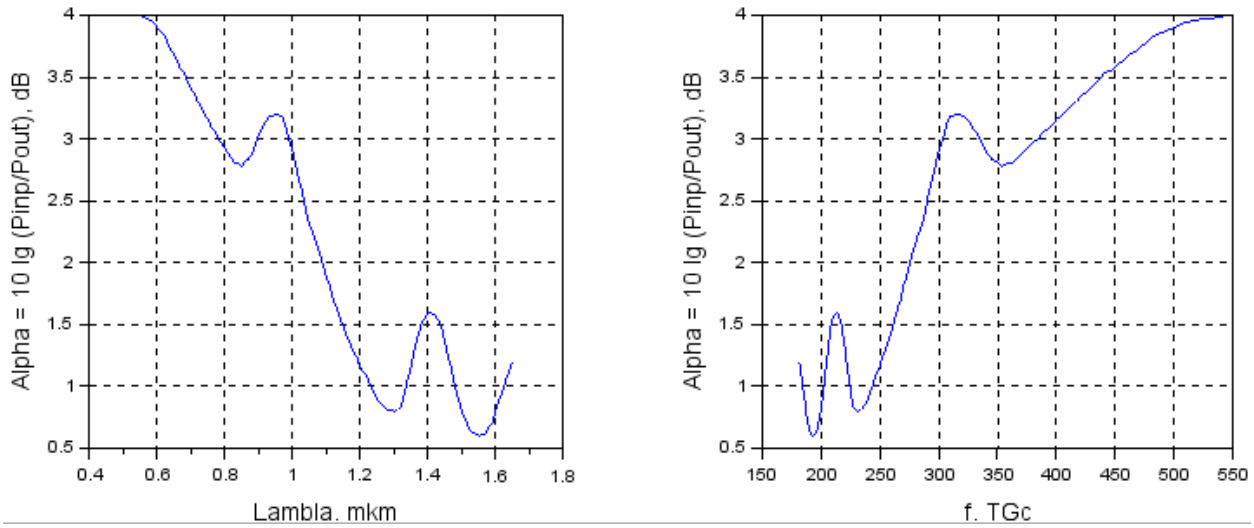
В нашем случае для получения приблизительных оценок фактора неравномерности натурные измерения заменим оцифровкой известных графиков зависимости коэффициента затухания от длины волны. Конкретно в данной статье используем для этих целей график на рис. 1. Для оцифровки переносим график по характерным точкам на лист миллиметровой бумаги и получаем значения отсчетов с шагом 10 нм. Фрагмент результатов оцифровки дан в табл. 1.

Таблица 1

Значения коэффициента затухания

λ мкм	α дБ/км	λ мкм	α дБ/км	λ мкм	α дБ/км	λ мкм	α дБ/км	λ мкм	α дБ/км	λ мкм	α дБ/км	λ мкм	α дБ/км	λ мкм	α дБ/км	λ мкм	α дБ/км	λ мкм	α дБ/км
0,66	3,62	0,76	3,09	0,86	2,82	0,96	3,19	1,06	2,24	1,16	1,40	1,26	0,86	1,36	1,30	1,46	1,24	1,56	0,61
0,67	3,56	0,77	3,07	0,87	2,84	0,97	3,18	1,07	2,16	1,17	1,35	1,27	0,84	1,37	1,40	1,47	1,14	1,57	0,62
0,68	3,54	0,78	3,00	0,88	2,88	0,98	3,10	1,08	2,08	1,18	1,28	1,28	0,81	1,38	1,50	1,48	1,00	1,58	0,68
0,69	3,46	0,79	2,97	0,89	2,96	0,99	2,98	1,09	1,98	1,19	1,24	1,29	0,81	1,39	1,55	1,49	0,90	1,59	0,70
0,70	3,40	0,80	2,92	0,90	3,04	1,00	2,90	1,10	1,88	1,20	1,15	1,30	0,80	1,40	1,60	1,50	0,80	1,60	0,80
0,71	3,36	0,81	2,88	0,91	3,08	1,01	2,78	1,11	1,82	1,21	1,12	1,31	0,81	1,41	1,59	1,51	0,74	1,61	0,90
0,72	3,30	0,82	2,84	0,92	3,14	1,02	2,66	1,12	1,70	1,22	1,08	1,32	0,84	1,42	1,58	1,52	0,67	1,62	0,95
0,73	3,26	0,83	2,80	0,93	3,18	1,03	2,56	1,13	1,64	1,23	1,00	1,33	0,94	1,43	1,54	1,53	0,63	1,63	1,05
0,74	3,20	0,84	2,80	0,94	3,19	1,04	2,40	1,14	1,56	1,24	0,96	1,34	1,06	1,44	1,48	1,54	0,62	1,64	1,12
0,75	3,16	0,85	2,78	0,95	3,20	1,05	2,30	1,15	1,48	1,25	0,90	1,35	1,15	1,45	1,36	1,55	0,60	1,65	1,20

Табличные данные размещаются в текстовом файле и передаются в программу обработки. Для следующих операций в рамках данной работы использовано свободно распространяемое программное обеспечение Scilab [13].

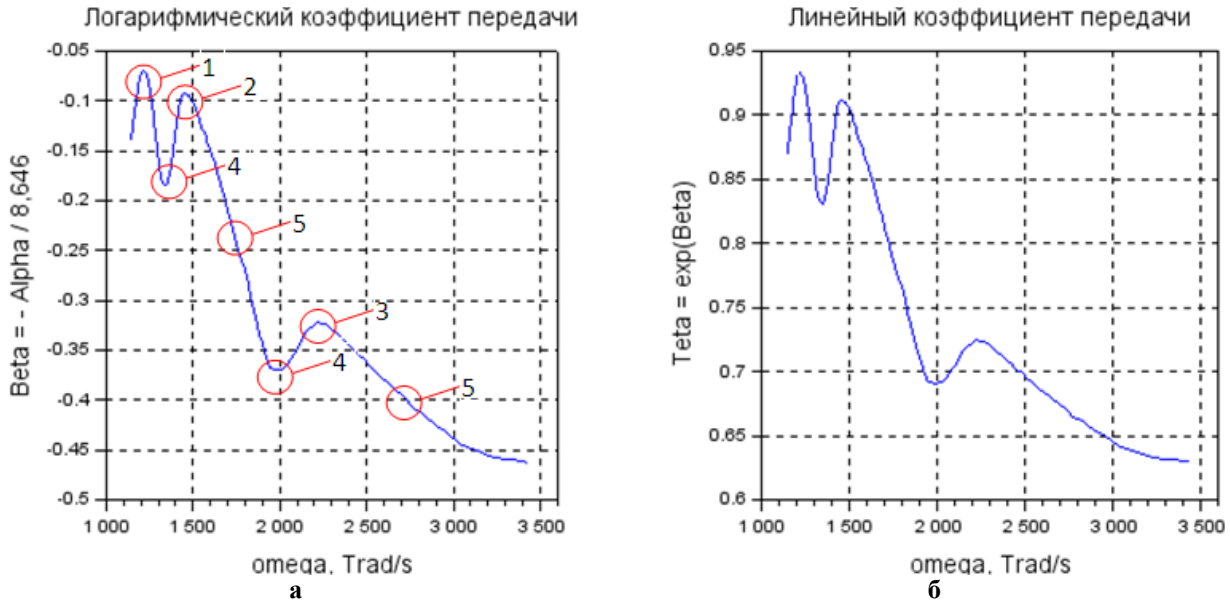


а б

Рис. 2. Зависимость удельного коэффициента затухания (в расчете на 1 км длины) в ОВ: а – от длины волны; б – от циклической частоты

По данным табл. 1 выполняется построение графика зависимости коэффициента затухания от длины волны и от частоты (рис. 2). Далее выполняется пересчет значений коэффициента затухания в значения коэффициента передачи (рис. 3). При этом частотная сетка с учетом размерностей, используемых в формулах (12–20) преобразуется по правилу $1ТГц \sim 2\pi \cdot Трад/с$.

Заметим, что локальные минимумы (рис. 1, рис. 2, а) – т.н. «окна прозрачности» соответствуют аналогичным локальным максимумам коэффициента передачи (рис. 3).



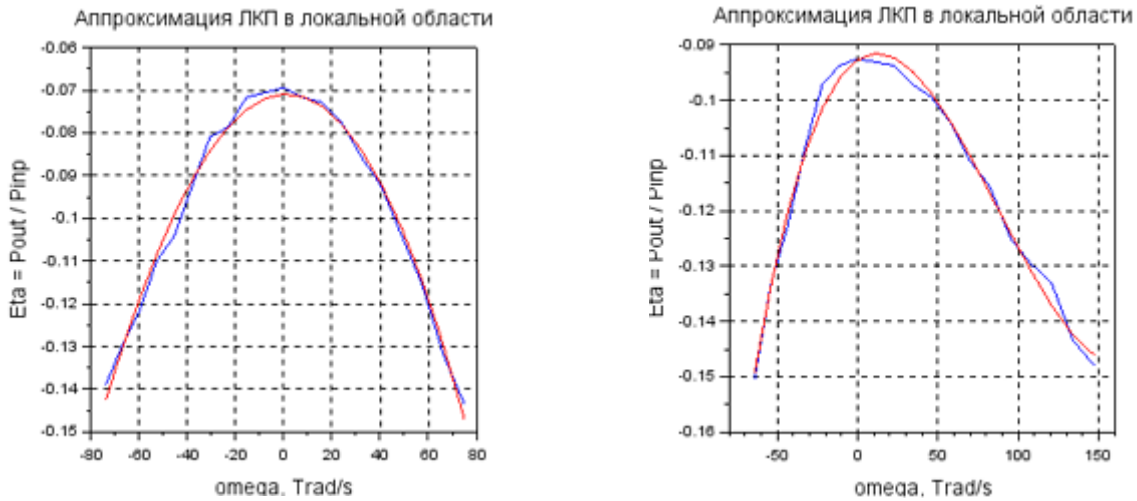
а б

Рис. 3. Зависимость удельного коэффициента передачи (в расчете на 1 км длины) в ОВ:
а – логарифмический коэффициент передачи ; б – линейный коэффициент передачи;
1–5 – характерные участки графика (1–3 – окна прозрачности)

На следующем шаге выполняется локальная аппроксимация полиномом вида (10) логарифмического коэффициента передачи. Для окрестностей окон прозрачности 1550 нм и 1330 нм (выноски 1 и 2 на рис. 3) результаты аппроксимации даны в виде графиков на рис. 4.

Полиномиальная аппроксимация выполняется методом наименьших квадратов в некоторых окрестностях характерных участков зависимости логарифмического коэффициента передачи от частоты.

Выполненные расчеты показывают, что в локальных областях шириной порядка 10–30 ТГц достаточно ограничиться 2-3 степенью полинома (10). Для окрестностей окон прозрачности 1550 нм, 1330 нм и 850 нм результаты вычисления коэффициентов аппроксимирующих полиномов даны в табл. 2. В этой таблице также даны оценки точности аппроксимации в виде относительной ошибки модели (параметр ε). Как видно из полученных результатов, относительная ошибка имеет порядок 0,1%, что можно считать удовлетворительной точностью.



а б

Рис. 4. Аппроксимации логарифмического коэффициента передачи:
а – для окна прозрачности 1550 нм ; б – для окна прозрачности 1300 нм

Заметим, что увеличение степени полинома сверх третьего порядка не приводит к сколько-нибудь существенному повышению точности. Более того, для окна прозрачности 1550 нм (выноска 1 на рис. 3) вполне приемлемую точность в полосе шириной 10 ТГц дает аппроксимация полиномом второй степени.

Расчеты (и анализ графиков рис. 3) показывают, что значения коэффициентов полинома (10) существенно зависят от выбранного участка аппроксимации.

Таблица 2

Значения коэффициентов локальных полиномиальных аппроксимаций (10)

ω_0, Трад/с	f_0, ТГц	λ_0, нм	β_0	β_1, с/Трад	β_2, (с/Трад)^2	β_3, (с/Трад)^3	ε, %
1216	193,5	1550	- 7.092D-02	3.295D-05	- 1.334D-05	- 8.321D-09	0,182
1450	230,8	1330	- 9.268D-02	1.965D-04	- 8.661D-06	3.302D-08	0,153
2218	352,9	850	- 3.257D-01	2.731D-05	- 9.253D-07	1.287D-09	0,201

При этом характер кривой в локальной области обусловливает превалирование той или иной составляющей полинома (10) , а также определяет знаки соответствующих коэффициентов. Так, в областях окон прозрачности превалирующий вклад вносят составляющие второго порядка. При этом знак коэффициента β_2 отрицательный. Аналогично, для областей локальных минимумов зависимости коэффициента передачи от частоты (выноски 4 на рис. 3), решающий вклад также дает составляющая второго порядка, но коэффициент β_2 имеет при этом положительное значение. Для других характерных участков (выноски 5 на рис. 3) превалирует линейная компонента полинома (10).

Для дальнейшего анализа порядка влияния фактора неравномерности заметим, что коэффициент β_0 не влияет на деформацию вида спектральной плотности: он в равной мере обусловливает затухание всех частотных компонентов. Следовательно, он также и не влияет на изменение начальной длительности оптического сигнала.

Также ограничимся рассмотрением только одной характерной области – 1550 нм (первая строка в табл. 2). С учетом ранее сделанных замечаний и данных табл. 2 можно положить в выражениях (19-20) $\psi(\omega) \approx -10^{-5}\omega^2$. Также положим, что точка 1550 нм соответствует точке нулевой дисперсии. Такое предположение приблизительно выполняется, по крайней мере, для ОВ типа SMF-LS фирмы “Corning” [4]. То есть, влиянием фактора дисперсии в данном случае можно пренебречь. Тогда в формуле (20) выражение для интеграла I_3 упрощается:

$$I_3 = \int_{-\infty}^{\infty} \mathrm{e}^{2z\psi}\, z^2 \psi'^2\, G_0^{\,2} d\omega \,. \qquad (22)$$

3. Оценка влияния фактора неравномерности на импульс Найквиста

Для получения приблизительных оценок влияния фактора неравномерности на увеличение длительности оптического сигнала, рассмотрим частную модель импульса Найквиста [14] со спектральной плотностью, близкой к прямоугольной. Для этого рассмотрим спектральную плотность в виде приподнятого косинуса с весьма малым коэффициентом скругления (рис. 5).

В этом случае норма первой производной спектральной плотности существенно меньше нормы самой плотности. Тогда значением интеграла I_2 в формулах (20) можно пренебречь.

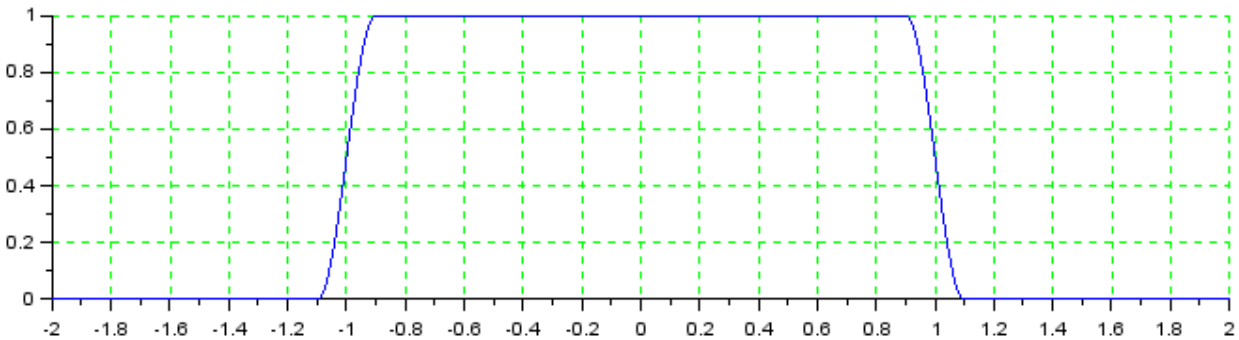


Рис. 5. Спектральная плотность импульса Найквиста в форме приподнятого косинуса с коэффициентом скругления 0,1

С учетом нормировки к энергии в формуле (19) и полагая спектральную плотность (рис. 5) приблизительно прямоугольной, а также учитывая значение коэффициента $\beta_2 \approx 10^{-5}$ и применяя теорему о среднем, получим приблизительное значение приращения эффективной длительности сигнала на расстоянии 1 км для полосы шириной 100 ГГц (-50…+50 ГГц, или -0,1π …+0,1π Трад/с):

$$\Delta T^2(z=1км) \approx 2\beta_2^2 \int_{-0,1\pi}^{0,1\pi} \omega^2 d\omega = \frac{4}{3}\cdot 10^{-10}\cdot(0,1\pi)^3 \approx 4,134\cdot 10^{-12}. \quad (23)$$

Оценка (23) дает приращение эффективной длительности сигнала в расчете на 1 км длины линии и ширины полосы 100 ГГ. В выбранном диапазоне частот такая полоса соответствует одному частотному каналу оборудования типа STM [15]. В области длин волн такая ширина полосы примерно равна 1 нм. С учетом размерностей погонный коэффициент удлинения оптического сигнала в данном случае составляет приблизительно $\Delta T(z=1км) \approx 2[пс/нм\cdot км]$.

Сравним полученную оценку с воздействием фактора дисперсии на увеличение длительности оптического сигнала. В различных источниках (например, [4]) для разных типов ОВ даются оценки погонного коэффициента дисперсии в диапазоне $3...20[пс/нм\cdot км]$. Как видим, полученное значение погонного коэффициента удлинения сопоставимо с этими значениями. В точке нулевой дисперсии влияние фактора неравномерности может вообще оказаться превалирующим.

Аналогичные оценки для окон прозрачности 1330 нм и 850 нм дают менее значимые оценки (табл. 2). Приблизительно $1,2[пс/нм\cdot км]$ для окна прозрачности 1330 нм и около $0,8[пс/нм\cdot км]$ для окна прозрачности 850 нм.

Как видим, существующие инженерные методики расчетов длины регенерационных участков [3,4] дают удовлетворительные оценки без учета фактора неравномерности. В то же время, для перспективных ВОСП этим фактором пренебрегать нельзя. В самом деле, в точке нулевой дисперсии, где можно планировать передачу сигнала без его расширения во временной области, фактор неравномерности может оказаться решающим. Так, для теоретических сигналов с малой базой можно использовать приблизительное соотношение:

$$B = \Delta T \cdot \Delta F \approx 1, \quad (24)$$

где ΔT – длительность сигнала во временной области; ΔF – ширина спектра сигнала.

Если принять ширину полосы в момент ввода сигнала в ОВ 100 ГГц, то из выражения (24) следует, что его начальная длительность может иметь порядок 10 пс. С учетом полученных оценок его длительность на расстоянии 100 км за счет фактора неравномерности может возрасти до 200 пс, а на расстоянии 300 км до 600 пс. Таким образом, обнаруженный эффект увеличения длительности оптического сигнала за счет фактора неравномерности следует считать значимым.

На основании формулы (24) обнаруженному эффекту можно дать обоснование с точки зрения классической теории сигналов [16]. Действительно, в рассматриваемом частном случае частотный коэффициент передачи (12) представляется в виде:

$$H(\omega) = \exp(-z\beta_2\omega^2), \quad (25)$$

иначе говоря, фактор неравномерности воздействует на входной сигнал как гауссов фильтр [14].

Для неотрицательных функций $a(x)$ и $b(x)$ элементарно доказывается неравенство:

$$\int_{-s}^{s} a(x)b(x)dx \le \int_{-s}^{s} a(x)dx \cdot \int_{-s}^{s} b(x)dx. \quad (26)$$

Принимая энергию сигнала в момент ввода в ОВ единичной, сравним значения эффективной ширины спектра в момент ввода в ОВ и на расстоянии z с учетом оператора (25):

$$\Delta\Omega^2(z) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} e^{-z\beta_2\omega^2}\omega^2 G_0^2 d\omega}{\int_{-\infty}^{\infty} e^{-z\beta_2\omega^2} G_0^2 d\omega} \lhd\rhd \int_{-\infty}^{\infty} \omega^2 G_0^2 d\omega = \Omega^2(z=0).$$

Полагая в последнем выражении неотрицательные функции $a(\omega) = e^{-z\beta_2\omega^2}$, $b(\omega) = \omega^2$, $c(\omega) = G_0^2$ и применяя неравенство (26) циклически, получаем, что эффективная ширина спектра в данном случае уменьшается вследствие эффекта неравномерности: $\Delta\Omega^2(z) \le \Delta\Omega^2(z=0)$. Соответственно, в силу соотношения (24), увеличивается эффективная длительность сигнала.

4. Оценка влияния фактора неравномерности на гауссов импульс

Оптический сигнал в форме гауссова импульса обладает рядом уникальных свойств, в частности удовлетворяет условию минимума приведенной базы (24) [2]. Поэтому представляет особый интерес исследование его устойчивости к фактору неравномерности. Здесь мы также выполним приблизительные расчеты в предположении, что аппроксимация ЛКП выполнена в окрестности окна прозрачности 850 нм (выноска 3 на рис. 3, третья строка в табл. 2). Кроме того, положим, что несущая (центральная) частота излучения лазера совпадает с точкой нулевой дисперсии.

Полагая энергию сигнала единичной, определим спектральную плотность сигнала $G_0(\omega)$ в момент ввода в ОВ через его энергетический спектр:

$$G_0^2(\omega) = A^2 \exp\left(-\frac{\omega^2}{2\sigma^2}\right) \Rightarrow G_0(\omega) = A\exp\left(-\frac{\omega^2}{4\sigma^2}\right), \quad A^2 = \frac{2\pi}{\sigma\sqrt{2\pi}}. \quad (27)$$

Определение спектральной плотности сигнала $G_0(\omega)$ (27) очевидно совпадает с теоретико-вероятностной функцией нормального распределения [17]. Пользуясь известными свойствами данной функции, получим выражения для энергии и эффективной ширины спектра:

$$E_0 = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} G_0^2(\omega)d\omega = 1, \quad \Omega_0^2 = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} \omega^2 G_0^2(\omega)d\omega = \sigma^2, \quad (28)$$

Для дальнейших расчетов используем показатель расчетной ширины спектра [2]: $\Delta\Omega = \pm 3\sigma$. В полосе шириной 6σ в данном случае сосредоточено более 97% энергии сигнала. Здесь мы рассматриваем полосу 100 ГГц ($2\pi \cdot 0{,}1\ Трад/с$). Тогда параметр $\sigma \approx \pi \cdot 0{,}03\ Трад/с$. Для получения образов сигнала во временной области выполним обратные преобразования Фурье над спектральной мощностью (27) в момент ввода в ОВ и для спектральной плотности с учетом коэффициента передачи на расстоянии 1 км. Для этого воспользуемся табличным интегралом [18, с. 344]:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \exp(-px^2 - qx) = \sqrt{\frac{\pi}{p}}\exp\left(\frac{q^2}{4p}\right), \quad \mathrm{Re}\, p > 0. \quad (29)$$

После тождественных преобразований получим:

$$S_0(t) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} G_0(\omega)e^{j\omega t}d\omega = \frac{A\sigma}{\sqrt{\pi}}\exp\left(-\sigma^2 t^2\right), \quad (30)$$

$$S_{z=1км}(t) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\beta_2^2\omega^2\right)G_0(\omega)e^{j\omega t}d\omega = \frac{A\sigma}{\sqrt{\pi(4\beta_2^2\sigma^2+1)}}\exp\left(-\frac{\sigma^2}{4\beta_2^2\sigma^2+1}t^2\right). \quad (31)$$

Как видно из полученных зависимостей (30, 31), во временной области сигнал сохраняет гауссову форму. В общем виде эти зависимость можно представить как $S(t) = b\exp(-at^2)$, где параметр b характеризует амплитуду сигнала, а параметр a – его длительность. Поскольку эффективная длительность сигнала определяется формулами:

$$T^2 = \frac{1}{E}\int_{-\infty}^{\infty} t^2 S^2(t)dt, \quad E = \int_{-\infty}^{\infty} S^2(t)dt, \quad (32)$$

то амплитудный параметр b после сокращений в формулах (32) не будет влиять на результат. Тогда можно использовать два табличных интеграла для вычисления эффективной длительности сигнала:

$$I_1 = \int_{-\infty}^{\infty} x^2\exp(-ax^2)\,dx = \frac{\sqrt{\pi}}{2a^{3/2}}, \quad I_2 = \int_{-\infty}^{\infty}\exp(-ax^2)\,dx = \sqrt{\frac{\pi}{a}} \Rightarrow T^2 = \frac{I_1}{I_2} = \frac{1}{2a}. \quad (33)$$

Подставляя в общее выражение (33) значения параметров из формул (30, 31), получим:

$$T_0^2 = \frac{1}{2\sigma^2}, \quad T_{z=1км}^2 = \frac{4\beta_2^2\sigma^2+1}{2\sigma^2} \Rightarrow \Delta T^2(z=1км) = T_{z=1км}^2 - T_0^2 = 2\beta_2^2. \quad (34)$$

Как видим, в принятой модели узкочастотного канала ВОСП, приращение эффективной длительности сигнала не зависит от его начальной длительности. Количественные оценки по формуле (34) дают результат: $\Delta T^2(z=1км) \approx 2\cdot 10^{-12} = 2\left[\frac{пс^2}{нм\cdot км}\right]$, или в линейном масштабе $\Delta T(z=1км) \approx 1{,}4\left[\frac{пс}{нм\cdot км}\right]$.

Таким образом, получены значения, приблизительно соответствующие значениям влияния фактора неравномерности для импульса Найквиста. Можно заметить, что для окон прозрачности 1330 нм и 1550 нм значения данного погонного коэффициента будут еще более значительными.

Заключение

В работе получены результаты, касающиеся уточнения моделей преобразования сигналов в оптическом волокне. Дана общая модель оператора, учитывающего одновременно дисперсионные эффекты и влияние фактора неравномерности коэффициента затухания. Приведена методика обработки экспериментальных данных, которая опробована на теоретическом примере.

Полученные результаты позволяют утверждать, что фактор неравномерности дает эффект удлинения оптического сигнала, сравнимый по величине с воздействием фактора материальной дисперсии.

Разработки, опубликованные в настоящей статье, могут использоваться для уточненных инженерных расчетов при проектировании перспективных волоконно-оптических систем передачи.

Вычисления в Scilab по заданным алгоритмам выполнил магистрант Гузун А.И. Остальные

результаты принадлежат Одегову Н.А.

Литература

1. BigData шагает по планете. Количество данных в мире удваивается каждые два года [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://rg.ru/2013/05/14/infa-site.html.

2. Одегов Н.А Основы теории аппроксимации оптических сигналов гауссовыми импульсами / Н.А. Одегов // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні нуки. – 2018. – № 5. – С. 42–72.

3. Корнейчук В.И. Оптические системы передачи / В.И. Корнейчук, Т.В. Макаров, И.П. Панфилов. – Київ : Техніка, 1994. – 386 с.

4. Бондаренко О.В. Волоконно-оптические кабели. Теоретические основы, конструирование и расчет, технология производства и эксплуатация : монография / О.В. Бондаренко, Д.В. Иоргачев, А.Ф. Данченко, А.В. Усов. – Одесса : Астропринт, 2000. – 536 с.

5. Одегов Н.А. Передача информации оптическими импульсами равной дисперсии / Н.А. Одегов // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2017. – № 2. – С. 28–38.

6. Одегов Н.А Операторы дисперсии и согласованные оптические сигналы / Н.А. Одегов // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні нуки. – 2017. – № 5. – С. 211–220.

7. Staschuk O. Method of determining the length of the amplifying section by four-wave mixing for the line based on the standard fiber / O. Staschuk, D. Bahachuk, I. Slobodianiuk, O. Yurieva // Proceedings of the O.S. Popov ONAT. – Odessa, 2017. – № 2. – С. 39–47.

8. Решетникова О.С. Оценка влияния фазовой самомодуляции на качество каналов ВОСП СРК с прямой модуляцией / О.С. Решетникова // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2012. – № 1. – С. 158–166.

9. Гауэр Дж. Оптические системы связи / Дж. Гауэр. – М. : Радио и связь, 1989. – 504 с.

10. Агравал Г. Нелинейная волоконная оптика / Агравал Г. – М. : Мир, 1996. – 323 с.

11. Затухание сигнала в волокне. Виды потерь в волокне [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://poznayka.org/s63251t1.html.

12. Варакин Л.Е. Теория сложных сигналов / Варакин Л.Е. – М. : Советское радио, 1970. – 376 с.

13. Scilab. Open source software for numerical computation [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://www.scilab.org.

14. Сукачев Э.А. Введение в теорию сигналов Найквиста / Э.А. Сукачев. – Одесса : Освіта України, 2016. – 108 с.

15. Макаров Т.В. Когерентные волоконно-оптические системы передачи / Макаров Т.В. – Одесса : ОНАС им. А.С. Попова, 2009. – 220 с.

16. Харкевич А.А. Спектры и анализ / А.А. Харкевич. – М. : Книжный дом «ЛИБКОМ», 2009. – 240 с.

17. Вентцель Е.С. Теория вероятностей : учеб. для вузов / Вентцель Е.С. – 6-е изд. стер. – М. : Высшая школа, 1999. – 576 с.

18. Прудников А.П. Интегралы и ряды. Элементарные функции / Прудников А.П., Брычков Ю.А., Маричев О.И. – М. : Наука, 1981. – 800 с.

References

1. BigData shagaet po planete. Kolichestvo dannyh v mire udvaivaetsja kazhdye dva goda [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : https://rg.ru/2013/05/14/infa-site.html.

2. Odegov N.A Osnovy teorii approksimacii opticheskih signalov gaussovymi impul'sami / N.A. Odegov // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2018. – № 5. – S. 42–72.

3. Kornejchuk V.I. Opticheskie sistemy peredachi / V.I. Kornejchuk, T.V. Makarov, I.P. Panfilov. – Kiiv : Tehnika, 1994. – 386 s.

4. Bondarenko O.V. Volokonno-opticheskie kabeli. Teoreticheskie osnovy, konstruirovanie i raschet, tehnologija proizvodstva i jekspluatacija : monografija / O.V. Bondarenko, D.V. Iorgachev, A.F. Danchenko, A.V. Usov. – Odessa : Astroprint, 2000. – 536 c.

5. Odegov N.A. Peredacha informacii opticheskimi impul'sami ravnoj dispersii / N.A. Odegov // Naukovi praci ONAZ im. O.S. Popova. – 2017. – № 2. – S. 28–38.

6. Odegov N.A Operatory dispersii i soglasovannye opticheskie signaly / N.A. Odegov // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2017. – № 5. – S. 211–220.

7. Staschuk O. Method of determining the length of the amplifying section by four-wave mixing for the line based on the standard fiber / O. Staschuk, D. Bahachuk, I. Slobodianiuk, O. Yurieva // Proceedings of the O.S. Popov ONAT. – Odessa, 2017. – № 2. – S. 39–47.

8. Reshetnikova O.S. Ocenka vlijanija fazovoj samomoduljacii na kachestvo kanalov VOSP SRK s prjamoj moduljaciej / O.S. Reshetnikova // Naukovi praci ONAZ im. O.S. Popova. – 2012. – № 1. – C. 158–166.

9. Gaujer Dzh. Opticheskie sistemy svjazi / Dzh. Gaujer. – M. : Radio i svjaz', 1989. – 504 s.

10. Agraval G. Nelinejnaja volokonnaja optika / Agraval G. – M. : Mir, 1996. – 323 s.

11. Zatuhanie signala v volokne. Vidy poter' v volokne [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : https://poznayka.org/s63251t1.html.

12. Varakin L.E. Teorija slozhnyh signalov / Varakin L.E. – M. : Sovetskoe radio, 1970. – 376 s.

13. Scilab. Open source software for numerical computation [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : https://www.scilab.org.

14. Sukachev Je.A. Vvedenie v teoriju signalov Najkvista / Je.A. Sukachev. – Odessa : Osvita Ukraïni, 2016. – 108 s.

15. Makarov T.V. Kogerentnye volokonno-opticheskie sistemy peredachi / Makarov T.V. – Odessa : ONAS im. A.S. Popova, 2009. – 220 s.

16. Harkevich A.A. Spektry i analiz / A.A. Harkevich. – M. : Knizhnyj dom «LIBKOM», 2009. – 240 s.

17. Ventcel' E.S. Teorija verojatnostej : ucheb. dlja vuzov / Ventcel' E.S. – 6-e izd. ster. – M. : Vysshaja shkola, 1999. – 576 c.

18. Prudnikov A.P. Integraly i rjady. Jelementarnye funkcii / Prudnikov A.P., Brychkov Ju.A., Marichev O.I. – M. : Nauka, 1981. – 800 s.

Рецензія/Peer review : 10.1.2019 р. Надрукована/Printed :15.2.2019 р.
Рецензент: к.т.н., проф. Стащук О.М.

DOI 10.31891/2307-5732-2019-269-1-211-215
УДК 658.589:005.4

Р.В. ПЕТРОВА, А.И. МОРОЗОВА
Харьковский национальный университет радиоэлектроники

ИННОВАЦИОННЫЙ РЕИНЖИНИРИНГ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ В ИНФОРМАЦИОННОЙ СРЕДЕ

В статье исследованы научно-технические аспекты проведения инновационного реинжиниринга бизнес-процессов (ИРБП) на промышленном предприятии. ИРБП рассматривается как система коренных преобразований в промышленной сфере. Это означает выход предприятия из кризиса, ускоренную адаптацию его к рыночным условиям, системному обновлению всех факторов и условий, способствующих достижению инновационной монополии на рынке. Управление предприятием должно основываться не на частичных улучшениях БП, а на непрерывном радикальном пересмотре и улучшении технологии. Так, внедрение инновационных технологий повышает конкурентоспособность и качество выпускаемой продукции, лидерство на рынке, увеличивает норму доходности.*

Ключевые слова: инновационный реинжиниринг, бизнес-процесс, промышленное предприятие, информационная система, конкурентоспособность, трансформация, инвестиционная деятельность, ресурсы предприятия.

R.V. PETROVA, A.I. MOROZOVA
Kharkiv National University of Radio Electronics

INNOVATIVE REENGINEERING OF BUSINESS PROCESSES IN THE INFORMATION ENVIRONMENT

Results of business processes (BP) and the principles of innovative reengineering. The first step towards the formation of an innovative transport enterprise should be a rethinking of how to organize a business. The implementation of the process approach (PP) replaces the functional one. The process approach allows you to fully realize the benefits of new innovative technologies and human resources. The enterprise should not be based on partial improvements of the BP, but on technologies of continuous radical revision and improvement. In our opinion, the business process should be aimed at obtaining a total final commercial result. Among the basic principles of the implementation of BP are the following: optimization of the routes of the processes; elimination of multiple cyclical approvals; exclusion of duplicate and unclaimed operations; consolidation of working procedures. It is necessary to take into account typical mistakes in the development and implementation of the PSU. They boil down to the following: the lack of a uniform research methodology in the improvement of BP; a large number of BP undergoes changes simultaneously; inefficient work with staff; the occurrence of rumours, fears, friction between employees; attempt to solve all the problems. Achievement of competitive advantages; such an enterprise has a strong position and leadership in the market; increases the rate of return. The concept of scientific and technological cooperation of the enterprise. Despite the fact that engineering has a high degree of interest, ordinary employees. In practice, the PSI includes other elements; for example, the use of modern methods of staff motivation. If you can not realize the potential of the enterprise. Undoubtedly, the PP must be accompanied by changes. The author proposes a sequence of stages of implementation (implementation) of the PSI: social construction; tactics of technological development of direct reengineering; pilot implementation and circulation if successful; summing up and evaluation of the project. RBP becomes free from automatic control of industrial enterprise.

Keywords: innovative reengineering, business process, industrial enterprise, information system, competitiveness, transformation, investment activity, enterprise resources.

Постановка задачи. В настоящий момент для Украины, наряду с отсутствием стратегии структурной перестройки, с одной стороны, и бессистемной ликвидацией ведущих предприятий базовых отраслей, с другой – характерна многоукладность, проявляющаяся в использовании ограниченного числа новых прогрессивных технологий наряду с широким применением устаревших. Решение этой проблемы видится в создании с участием правительства, ведущих институтов и на основе опыта мировых лидеров мощного и гибкого инновационного потенциала, который обеспечит переход общества к качественно новому типу развития в технологической сфере за счет глубокой реконструкции и модернизации производства при одновременной смене устаревших технологий на новые.

Стратегическое управление современным предприятием должно сосредоточить все усилия на осуществлении долгосрочной стратегии инновационного развития. Первым шагом на пути формирования инновационного потенциала предприятия должно стать переосмысление способов организации бизнеса и использование принципиально отличного от функционального подхода, который позволил бы в полной мере реализовать преимущества новых технологий и человеческих ресурсов. Ориентация на отдельные задачи устарела в мире, конкуренции и изменений. Теперь компании должны быть организованы на основе ключевых бизнес-процессов. Только инновационный реинжиниринг БП предусматривает новый способ мышления, рассматривая построение каждого предприятия как инженерную деятельность, в основе которой лежит производственный процесс. Следует также отметить, что управление предприятием должно основываться не на частичных улучшениях бизнес-процессов, а на непрерывном радикальном пересмотре и улучшении технологии.

Анализ последних источников. Впервые понятие «реинжиниринг» ввели в обиход М. Хаммер и Дж. Чампи [1]. Вскоре после этого была опубликована статья, в которой предлагался похожий подход к организационному изменению. Т. Давеннорт и Дж. Шорт [2] назвали его перепроектированием или

* Автор вводит понятие «Инновационный реинжиниринг бизнес-процессов»

редизайном бизнес-процессов и поставили в центр обсуждения понятие «инновации бизнес-процесса».

Существенный вклад в исследование проблем реинжиниринга бизнес-процессов предприятия сделали такие зарубежные и отечественные ученые, как Л. Брехт, А. Брянцева, Ж. Гуляр Франсис, А. Гнатуш, T. Davenport, J. Short, А. Костенко, В. Мильник, T. Hess, Л.Н. Оголева, М. Пушкарева, В. Радиковский, М. Робсон, Д. Салах, Е. Чернецова, Ф. Уллах, М. Хаммер, Дж. Чампи, Дж. Шорт и др.

Цель исследования: на основе анализа подходов инновационного реинжиниринга в преобразовании бизнес-процессов, выработать рекомендации для обновления продукции и технологии, которые обеспечат концентрацию финансовых, материальных, научно-технических и человеческих ресурсов для осуществления долгосрочной стратегии предприятия.

Изложение основного материала. Прежде всего важно дать определение бизнес-процесса. По нашему мнению, бизнес-процесс – это упорядоченная во времени совокупность работ, предназначенная для получения заданного конечного коммерческого результата. На рис. 1 приведен упрощенный вариант модели бизнес-процесса. БП строятся по принципу «как должно быть» на основе реализации бизнес-стратегии предприятия. Основным требованием к моделям БП является оперативная настройка и перенастройка БП в зависимости от изменения требований потребителя.

Принципы совершенствования бизнес-процессов разнообразны: оптимизация маршрутов выполнения процессов; сокращение зависимости процессов от функциональной иерархии (делегирование полномочий и ответственности); встраивание в процесс основных функций управления (планирование, контроль); объединение рабочих процедур; исключение многократных циклических согласование; минимизация времени выполнение процессов (устранение «простоев»); фиксация информации один раз – у источника ее возникновения; исключение дублируемых и невостребованных операций; соответствие привлеченных ресурсов поставленным задачам.

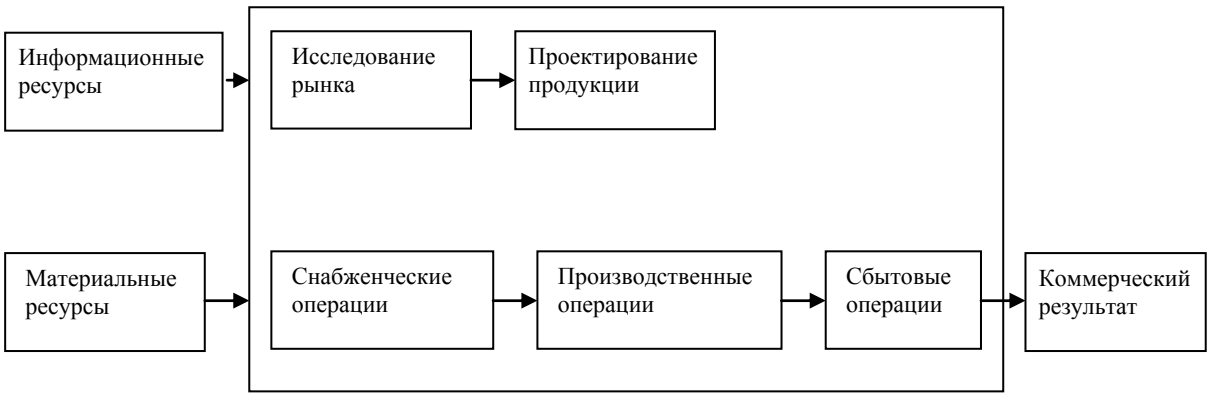


Рис. 1. Пример укрупненной модели бизнес-процессов производственной компании

Принципиальным стал вопрос об отражении типовых ошибок при разработке и внедрении инновационных бизнес-процессов в рамках совершенствования системы управления. Они сводятся к следующему:

Недостаточное внимание первых лиц и акционеров компании к организации и контролю реализации проекта.

Отсутствие единой методики исследования и совершенствования бизнес-процессов.

«Камерная» разработка моделей: созданные модели становятся «чужими» и рассматриваются сотрудниками организации как «насаждаемые насильно».

Большое количество процессов подвергается изменениям одновременно.

Неэффективная работа с персоналом: возникновение слухов, опасений, трений между сотрудниками.

Попытка решить все проблемы за счет тотальной автоматизации.

Нехватка ресурсов (человеческих, финансовых, временных).

В настоящее время выделяют следующие основные виды реинжиниринга: биореинжиниринг [3], превентивный, межотраслевой, сопряженный реинжиниринг, риск-инжиниринг [4], технологический, строительный, организационно- производственный, социальный, инновационный, комплексный реинжиниринг [5], реинжиниринг финансовых бизнес-процессов [6], экс-реинжиниринг [7], прямой и обратный реинжиниринг [8] и др. И хотя расстановка акцентов и интерпретация подходов различны, но все едины во мнении о важности трех факторов, которые определил М. Хаммер: процессное мышление, радикальное изменение и возможности информационных технологий [1].

Следует выделить понятие «технологический реинжиниринг». Под технологическим реинжинирингом следует понимать комплексную процедуру, которая предусматривает разработку или куплю-продажу новых НИОКР и технологий, производственного опыта, знаний персонала, ноу-хау с целью дальнейшего внедрения новых технологий производства и их диффузии в производство для коммерциализации новых товаров и новых услуг, для расширения рыночного присутствия и усиления

конкурентных преимуществ [5].

Технология является важнейшим фактором производства и служит для промышленного предприятия инструментом достижения наивысших конкурентных преимуществ. Так, внедрение новых инновационных прогрессивных видов технологий повышает конкурентоспособность и качество выпускаемой продукции, обеспечивает предприятию прочную конкурентную позицию и лидерство на рынке, увеличивает норму доходности.

Концепция инновационного реинжиниринга БП подразумевает революционное, скачкообразное развитие научно-технологического потенциала предприятия. Это объясняется тем, что модернизация и эволюция базовых технологий, до некоторого времени успешно справляющиеся с целями улучшения показателей эффективности предприятия, в конечном итоге, по мере совершенствования технологий, перехода их в стадию зрелости и насыщения рынка становятся неэффективными. В недрах сложившегося технологического уклада возникают прорывы принципиально новых технологий, и эволюционный тип технологического развития сменяется революционным.

Именно в последние десятилетия стало очевидным, что технология превратилась в движущую силу и важнейшее конкурентное преимущество, которое определяет стратегическое будущее предприятия. На основе новых НИОКР и технологий предприятие может завоевать и сохранить превосходство в конкурентной борьбе.

М. Хаммер и Дж. Чампи, приводя в пример опыт IBM Credit, Ford, Kodak, Chrysler, American Express, Texas Instruments, Duke Power и Deer, настаивают на использовании новейших инновационных технологических возможностей для достижения принципиально новых целей. С помощью так называемого индуктивного мышления они предлагают найти новые, незнакомые возможности технологии, подчеркивая, что новой является только та технология, которая еще не продается, и добиться успеха могут только те предприятия, которые просят о создании нужных им технологий задолго до их появления на рынке [1].

Идея проектов реинжиниринга «с чистого листа» нашла своих почитателей, однако одновременно она была подвергнута и жесткой критике. В частности, это касается практической возможности внедрения принципиально новых технологий. Существование сформировавшейся среды технологий и наличие стандартного образца базовой технологии, выражаясь в инерционности действующей системы, подчас препятствуют внедрению альтернативных и более перспективных технологий. Вторым объектом критики стал «механицизм» концепции реинжиниринга, отсутствие в ней социального фактора. Несмотря на угрозу сокращения штатов в случае успеха проекта реинжиниринга, концепцией подразумевались высокая степень заинтересованности в результатах реинжиниринга рядовых сотрудников, а также гибкость и вовлеченность в процесс руководства. На практике однако оказалось, что организационные структуры не позволяют внедрять инновации в рамках краткосрочных проектов, т. к. коренные перемены как правило требуют отказа от устоявшихся традиций, ценностей, корпоративных интересов, неформальных властных структур и сложившихся отношений внутри организации, что не может происходить без протеста со стороны персонала.

Таким образом, в самой идее, подразумевать под технологическим реинжинирингом использование только новой технологии и ничего более, кроется ошибка. Ведь технология в проекте реинжиниринга – только одна из движущих сил радикальных изменений. На практике реинжиниринг включает еще и другие элементы: например, правильное использование принципов управления процессами, использование методов развития организации и всеобщего качества, а также современные методы мотивации и управления персоналом. По мнению Д. Сахала [9], в некоторых случаях смены технологий роль работника, качество его обучения и освоение уже накопленных опыта и знаний значит больше, чем применяемая техника. Подтверждает этот тезис интенсивное экономическое развитие стран Юго-Восточной Азии (Южная Корея, Тайвань, Гонконг), чей технологический уклад связан с заимствованными, но принципиально новыми технологическими системами, ориентированными на завершающие стадии жизненного цикла производств и дешевый высококачественный труд.

Школа социотехнических систем, основанная Тавистокским институтом человеческих отношений в 50-60-х гг. XX в. впервые обратила внимание на необходимость учитывать социальные, а не только технические аспекты системы. Если не учитывать и не управлять социальными аспектами изменений соответствующим образом, никогда не удастся реализовать весь потенциал технических. Таким образом, возникающие благодаря новым технологиям изменения в бизнес-процессах должны сопровождаться изменениями в политике управления человеческими ресурсами [8].

Следует отметить, что сами М. Хаммер и Дж. Чампи признают: более половины проектов по инновационному реинжинирингу бизнес-процессов не были завершены или же не достигли желаемой цели [1]. Не последнюю роль в этом сыграли несовершенство и неполнота методологии инновационного реинжиниринга бизнес-процессов. Она не отражала всей сложности проектов реинжиниринга и часто на практике разработанные методики были несовместимы друг с другом.

Т. Хесс и Л. Брехт [10] проанализировали 15 методологий проведения реинжиниринга и пришли к выводу, что, несмотря на принципиальное различие некоторых моментов, существуют факторы, важность которых признается всеми изученными методологиями. Рассматривая технологический реинжиниринг как классический случай краткосрочного инновационного проекта выделяют начальную фазу, фазу разработки, реализации и завершения, которые он проходит, как и любой другой проект. В этом все методологии едины. Различия начинаются с целей, которые стоят перед проектом, и принципов, лежащих в основе

перепроектированных процессов.

На основе анализа существующих методологий проведения инновационного реинжиниринга бизнес-процессов и их практического применения автор предлагает методологию для осуществления инновационного реинжиниринга и выделяет следующие этапы его проведения:

1. Социальное конструирование: мотивация персонала, перестройка его работы, обучение и переквалификация, создание новой рабочей среды, включая организационные и социальные планы развития, создание проектной группы (выбор владельца процесса, лидера команды, коммуникатора, внешнего консультанта, координатора, участников команды; председателя, навигатора, генератора идей, наблюдателя/оценщика, работника-исполнителя, снабженца, коллективиста-миротворца, человека, расставляющего точки над i, аутсайдера).

2. Визуализация образа будущей компании и окружающего ее мира на основании внедрения новой технологии. На этом этапе необходимо выработать взгляд на новую компанию и сформулировать его в терминах спецификации основных целей компаний, исходя из ее стратегии, потребностей клиентов, общего уровня бизнеса в отрасли (определяется на основании результатов проведенного бенчмаркинга) и текущего состояния компании. В ходе маркетинговой экспресс-диагностики не стоит забывать о принципах индуктивного мышления: в рамках поиска новых возможностей технологии следует ориентироваться не на желания клиента, а на его потребности.

3. Оценка состояния производственных систем предприятия в ходе проведения ретроспективного реинжиниринга. На этом этапе исследуются применяемые на предприятии технологии и их свойства, выделяются и характеризуются отдельные технологические процессы, оценивается их качество, исследуется научная база технологического развития, стратегия, техническая политика и тактика технологического развития, производственный аппарат и технологическая, возрастная, воспроизводственная структура основных производственных фондов, производительность и эффективность работы персонала, структура выпуска продукции и ее обновления, приоритетность задач научно-технического и технологического развития, организация мероприятий по научно-техническому развитию производства, принципы организации производственных систем и пр.

4. Осуществление прямого инжиниринга:

- выделение технологических бизнес-процессов для целей реинжиниринга;
- проектирование процесса смены технологии в инновационном реинжиниринге БП;
- разработка информационной системы, осуществляющей поддержку нового бизнеса с помощью информационных технологий.

5. Пилотное внедрение и тираж в случае успеха.

6. Фаза завершения. На этом этапе осуществляют общее подведение итогов и оценку эффективности проекта инновационного реинжиниринга БП.

В ходе проведения ИРБП изменения происходят не только в рамках производственных систем – они затрагивают все аспекты деятельности промышленного предприятия: меняются должности и необходимые для них сотрудники; линейной логике выполнения работ приходит на смену логический порядок; происходит отказ от стандартизации – вместо этого разрабатываются различные версии одного процесса; сокращается количество проверок – используют совокупные или отложенные меры контроля; преобладают сочетания централизованных и децентрализованных действий и т. д.

Выводы. Обобщение теоретических основ экономической сущности инновационного реинжиниринга БП в контексте стратегического управления конкурентоспособностью промышленного предприятия позволяет сделать следующие выводы.

1. В современную постиндустриальную эпоху именно промышленному предприятию принадлежит ведущая роль в обеспечении научно-технического прогресса, обновлении продукции и технологии, потому что только крупные промышленные предприятия обеспечивают необходимую концентрацию финансовых, материальных, научно-технических и человеческих ресурсов для осуществления долгосрочной стратегии инновационного развития, ориентированной на разные потребности рынка и не поддающейся дестабилизирующему влиянию внешних факторов.

2. Концепция инновационного реинжиниринга, сыграв важную роль в возрождении и развитии таких компаний, как IBM, American Express, Ford, Chrysler, Texas Instruments, Duke Power, Deer, завоевала быстрый успех в бизнесе и популярность в массах. Из подобных примеров становится ясным, что ориентация конкретной организации на реинжиниринг, реструктуризацию, инновационную и инвестиционную деятельность является центральной стратегией функционирования организации в рыночной экономике.

3. Инновационный реинжиниринг БП становится главным инструментом стратегического управления современным промышленным предприятием для осуществления им долгосрочной стратегии инновационного развития.

4. Формирование методологии проведения инновационного реинжиниринга БП все еще не окончено. На основе методологий М. Хаммера и Дж. Чампи и методологии Кодак, учитывая необходимость привязки к стратегии предприятия, предложенной в методологии Р. Манганелли и М. Кляйна, автор предложил собственный вариант подхода к проведению инновационного реинжиниринга БП, обращая особое внимание на социальный аспект внедрения проекта реинжиниринга. Методология, учитывающая

всю сложность проектов инновационного реинжиниринга БП, является залогом успешного осуществления проекта и как результат приобретения промышленным предприятием инновационной монополии.

5. Отдавая себе отчет в многоукладности и несбалансированности экономического развития, Украине следует более четко и целенаправленно стремиться к глубокой реконструкции и модернизации производства при одновременной смене устаревших технологий на новые. Инновационный реинжиниринг БП позволит создать условия для приоритетного развития пятого и зарождающегося шестого технологических укладов на территории Украины, что позволит стране в будущем включиться в широкомасштабную трансформацию, происходящую в мировой экономике.

Литература

1. Hammer, M. and Champy, J. (1993) Reengineering the Corporation: a Manifesto for Business Revolution, London: Nicholas Brealey.
2. Davenport T., Short J. The New Industrial Engeneering: Information Technology and Business Process Redesign. In: Sloan Management Review, 1990, Summer.
3. Гуияр Франсис Ж. Преобразование организации / Гуияр Франсис Ж., Келли Джеймс Н. ; [пер. с англ.]. – М. : Дело, 2000. – 376 с.
4. Брянцева JI. В. Современная парадигма реинжиниринга / JI. В. Брянцева // Вестник ЦИРЭ. – Воронеж : ЦИРЭ, 2008. – Вып. 24. – С. 53–62.
5. Реинжиниринг производства : учебное пособие / под ред. Л.Н. Оголевой. – М. : КНОРУС, 2005. – 304 с.
6. Мыльш В. В. Реинжиниринг финансовых бизнес-процессов в условиях применения CALS технологий / В. В. Мыльш, М. Б. Пушкарева // Финансовые и бухгалтерские консультации. – 2003. – № 12. – С. 34–38.
7. Гнатуш А. Реинжиниринг: многое в малом / А. Гнатуш // «IT Manager». – 2004. – № 4(16).
8. Робсон М. Реинжиниринг бизне с-процессов: Практическое руководство / Робсон М., Уллах Ф. ; пер. с англ. ; под ред. Н. Д. Эриашвили. – М. : ЮНИТИ-ДАНА, 2003. – 222 с.
9. Сахал Д. Технический прогресс: концепции, модели, оценки / Сахал Д. ; пер. с англ., под ред. и вступ., статья А. А. Рывкина. – М. : Финансы и статистика, 1985. – 366 с.
10. Hess, T.; Brecht, L.: State of the Art des Business Process Redesign: Darstellung und Vergleich bestehender Methoden. 2. Auflage, Wiesbaden (Gabler) 1996.
11. Костенко А. А. Теоретические аспекты проведения технологического реинжиниринга на промышленных предприятиях / А. А. Костенко // Энергосбережене. Энергетика. Энергоаудит. – 2012. – № 12. – С. 12–17.

References

1. Hammer, M. and Champy, J. (1993) Reengineering the Corporation: a Manifesto for Business Revolution, London: Nicholas Brealey.
2. Davenport T., Short J. The New Industrial Engeneering: Information Technology and Business Process Redesign. In: Sloan Management Review, 1990, Summer.
3. Guijar Fransis Zh. Preobrazovanie organizacii / Guijar Fransis Zh., Kelli Dzhejms N. ; [per. s angl.]. – M. : Delo, 2000. – 376 s.
4. Brjanceva JI. V. Sovremennaja paradigma reinzhiniringa / JI. V. Brjanceva // Vestnik CIRJe. – Voronezh : CIRJe, 2008. – Vyp. 24. – S. 53–62.
5. Reinzhiniring proizvodstva : uchebnoe posobie / pod red. L.N. Ogolevoj. – M. : KNORUS, 2005. – 304 s.
6. Myl'sh V. V. Reinzhiniring finansovyh biznes-processov v uslovijah primenenija CALS tehnologij / V. V. Myl'sh, M. B. Pushkareva // Finansovye i buhgalterskie konsul'tacii. – 2003. – № 12. – S. 34–38.
7. Gnatush A. Reinzhiniring: mnogoe v malom / A. Gnatush // «IT Manager». – 2004. – № 4(16).
8. Robson M. Reinzhiniring bizne s-processov: Prakticheskoe rukovodstvo / Robson M., Ullah F. ; per. s angl. ; pod red. N. D. Jeriashvili. – M. : JuNITI-DANA, 2003. – 222 s.
9. Sahal D. Tehnicheskij progress: koncepcii, modeli, ocenki / Sahal D. ; per. s angl., pod red. i vstup., stat'ja A. A. Ryvkina. – M. : Finansy i statistika, 1985. – 366 s.
10. Hess, T.; Brecht, L.: State of the Art des Business Process Redesign: Darstellung und Vergleich bestehender Methoden. 2. Auflage, Wiesbaden (Gabler) 1996.
11. Kostenko A. A. Teoreticheskie aspekty provedenija tehnologicheskogo reinzhiniringa na promyshlennyh predprijatijah / A. A. Kostenko // Jenergosberezhene. Jenergetika. Jenergoaudit. – 2012. – № 12. – S. 12–17.

Рецензія/Peer review : 25.1.2019 р. Надрукована/Printed :15.2.2019 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Гурин В.Н.

DOI 10.31891/2307-5732-2019-269-1-216-219
УДК 621.391.63

М.В. ВАСИЛЬКІВСЬКИЙ, Р.П. ПАЛАМАРЧУК
Вінницький національний технічний університет

ОЦІНЮВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ ЛІНІЙ ЗВ'ЯЗКУ ЗА КРИТЕРІЄМ КОЕФІЦІЄНТА ПОМИЛОК

Переважна кількість існуючих волоконно-оптичних телекомунікаційних мереж доступу використовує двійковий (бінарний) код та амплітудну модуляцію із двома рівнями напруги. Однією із основних характеристик, за якою можна встановлювати якість зв'язку, є бітовий коефіцієнт помилок. Даний параметр визначається як відношення помилково декодованих біт до загальної кількості переданих інформаційних бітів. Досліджено залежність бітового коефіцієнта помилок від характеристик оптичного приймача. Розглянуто залежність чутливості оптичного приймача від заданого значення бітового коефіцієнта помилок, частоти та струмової чутливості. Визначено формулу, що описує залежність зміни бітового коефіцієнта помилок від значення сигнал/шум на вході оптичного приймача.

Ключові слова: волоконно-оптична система передачі; бітовий коефіцієнт помилок; інформаційна безпека.

M.V. VASYLKIVSKYI, R.P. PALAMARCHUK
Vinnytsia National Technical University

EVALUATION OF ENERGY PARAMETERS OF FIBER-OPTIC COMMUNICATION LINES UNDER THE BIT ERROR RATE CRITERIA

In the article analyses the dependence of the energy characteristics of fiber-optic communication systems. According to the obtained data, graphs of dependence of energy parameters are constructed. The vast majority of existing fiber-optic telecommunications access networks uses binary code and amplitude modulation with two voltage levels. One of the main characteristics by which you can set the quality of communication is the bit error rate. This value is defined as the ratio of false decoded symbols to the total number of symbols transmitted. Bit error rate directly depends on the input characteristics of the optical receiver. Another characteristic is the power of the optical signal at the output/input of the transmitter and the receiver. Knowing these parameters, you can keep statistics, predict the loss in signal propagation through the communication lines and establish the presence of unauthorized connections to the network. The dependence of the sensitivity of the optical receiver on the given value of bit error rate, frequency and transmitter current sensitivity is considered. The dependence of the change of the bit error rate on the signal/noise value at the input of the optical receiver is presented. Was defined a formula that describes the dependence of the change of the bit error rate on the signal / noise value at the input of the optical receiver. These dependencies need to be taken into account when constructing fiber-optic transmission systems to ensure the normal functioning and prediction of a change in the bit error rate.

Keywords: fiber-optic communication system; bit error rate; information security.

Вступ

В якості оптичних приймачів у волоконно-оптичних мережах застосовуються оптичні модулі, що використовують приймачі з *p-i-n* фотодіодом. Основними характеристиками волоконно-оптичних мереж (ВОМ) є потужність оптичного сигналу на виході передавача та вході приймача відповідно і бітовий коефіцієнт помилок BER (Bit Error Rate). Його величина визначається як відношення декодованих з помилками бітів до загального числа переданих біт [1, 2]. За вказаними характеристиками можна вести статистику, прогнозувати втрати при поширенні сигналу лініями зв'язку (ЛЗ), встановлювати наявність несанкціонованого доступу (НД) до мережі. Значення потужності сигналу у волоконно-оптичних лініях зв'язку (ВОЛЗ) безпосередньо впливає на якість переданої інформації [3]. Під критерієм якості розуміють відношення прийнятої інформації до переданої (BER). Даний вплив визначається бітовим коефіцієнтом помилок (БКП).

Причиною появи помилок є вплив власних шумів цифрового лінійного тракту (ЦЛТ). Для нормальної роботи цифрової системи передачі (ЦСП) необхідно, щоб рівень шумів не перевищував деякого порогового значення. Значення БКП буде зменшуватись при збільшенні амплітуди інформаційного сигналу. Мінімальне значення середньої потужності оптичного сигналу, яке необхідно для передачі сигналів із заданим БКП характеризує чутливість оптичного приймача.

Метою роботи є підвищення ефективності функціонування ВОЛЗ за рахунок оцінювання енергетичних характеристик ВОЛЗ і коефіцієнта помилок BER на виході волоконно-оптичної системи передачі (ВОСП) та встановлення чинників, які впливають на зміну чутливості оптичного приймача. Дані характеристики необхідно враховувати при побудові ВОСП для забезпечення ефективного функціонування та прогнозування зміни БКП.

Основна частина

Для забезпечення заданого значення BER на виході оптичного приймача необхідно щоб вхідна потужність оптичного сигналу на його вході була більша за мінімальну оптичну потужність, тобто чутливість приймача. В рекомендаціях МСЕ-Т G.691, G.692, G.659.1, вказано, що розрахункова норма бітового коефіцієнта помилок (БКП) для ділянки оптичного підсилення складає не більше 10^{-12}. Даний коефіцієнт залежить від Q-фактору та розраховується за формулою:

$$BER = \frac{1}{2} erfc\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right), \quad (1)$$

де додаткова функція помилок визначається так:

$$erfc(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_x^{\infty} e^{-x^2} dx. \quad (2)$$

БКП $BER = 10^{-12}$ відповідає значення $Q \approx 7$. В роботі [4] було наведено формулу (3), яка пов'язує порогове значення $Q_{пр}$ із мінімальною (пороговою) потужністю $P_{пр}$ на вході оптичного приймача, при якій можна забезпечити необхідний БКП:

$$P_{пр} = \left(Q_{пр} / S_i\right) \cdot \left(4kT \cdot F_y \cdot f_в / R_{зз}\right), \quad (3)$$

де S_i – струмова (монохроматична) чутливість оптоелектронного перетворювача (фотодіода);

$k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ (Дж/град) – стала Больцмана;

T – абсолютна температура, К;

F_y – коефіцієнт шуму підсилювача;

$f_в = f_m$ – тактова частота сигналу;

$R_{зз} \approx \left(2\pi \cdot f_в \cdot C_{зз}\right)^{-1}$ – опір резистора в колі зворотного зв'язку.

З виразу (3) видно, що БКП напряму пов'язаний із чутливістю приймача через параметр Q-фактору. Таким чином зміна вхідної потужності призводить до зміни Q-фактору та навпаки, що в свою чергу змінює БКП. Для знаходження порогового значення Q-фактору, тобто необхідного значення сигнал/шум використовується вираз [4]:

$$20\lg Q_{пр} = 4,63 + 11,42 \lg\left[\lg\left(BER^{-1}\right)\right], \quad (4)$$

де $20\lg Q_{пр}$ – значення сигнал/шум, дБ.

Вираз (4) не враховує запас завадозахищеності 1...4 (дБ). У подальшому позначення $20\lg Q_{пр}$ замінимо на S/N. Оскільки, БКП є вихідною характеристикою приймача, а відношення S/N вхідною та вихідною характеристикою ВОЛЗ, то для оцінки зміни БКП необхідно отримати відповідний вираз, який пов'яже зміну вихідного параметру відповідно до зміни вхідного:

$$BER = \frac{1}{10^{10^{\frac{S/N - 4,63}{11,42}}}}. \quad (5)$$

Представивши $10^{\frac{S/N-4,63}{11,42}}$ як A, можна вираз (5) записати у такому вигляді:

$$BER = \frac{1}{10^A}.$$

У роботі [5] запропоновано алгоритм контролю інформаційної захищеності ВОЛЗ шляхом циклічного вимірювання БКП. Такий аналіз можна проводити на основі отриманого виразу. Побудуємо графік залежності БКП від значення сигнал/шум на вході оптичного приймача з урахуванням (5) та графік залежності БКП від Q-фактору.

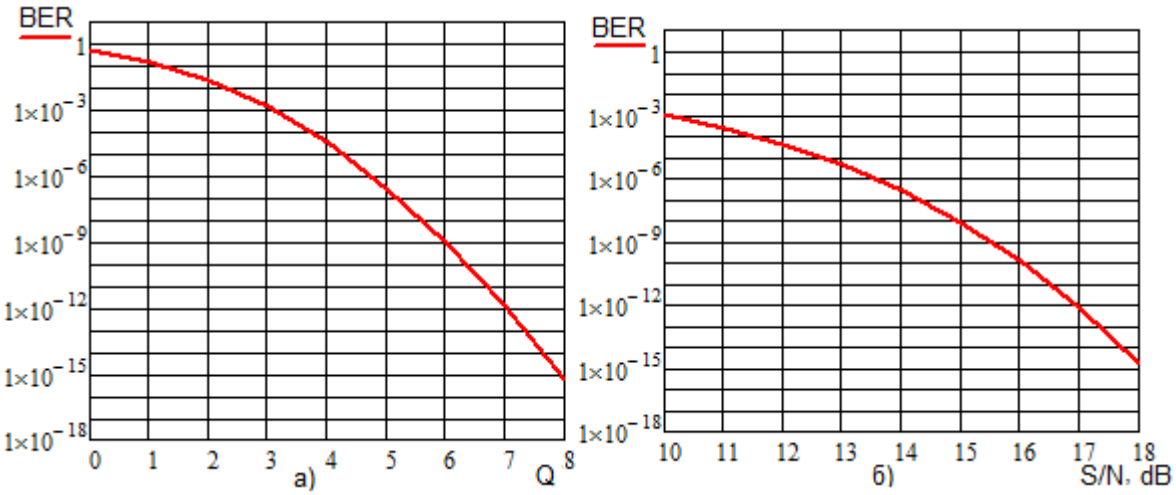


Рис. 1. Залежність БКП: а) від *Q*-фактору; б) від відношення *S/N*

З виразу (3) бачимо, що порогова чутливість приймача залежить від заданого БКП, струмової чутливості приймача, власних шумів підсилювача та частоти. Порівнюючи графіки на рис. 1, можна зробити висновок про те, що запропонована формула коректно відображає залежність зміни БКП від зміни відношення сигнал/шум на вході оптичного приймача. Тому за отриманими графіками можна визначити динамічний діапазон потужності сигналів у волоконно-оптичному лінійному тракті (ВОЛТ).

Експериментальна частина

Для проведення оцінки зміни енергетичних параметрів приймача приймемо, що власні шуми підсилювача відсутні та використовується *p-i-n* фотодіод із значенням $S_i = 0,85$ [6].

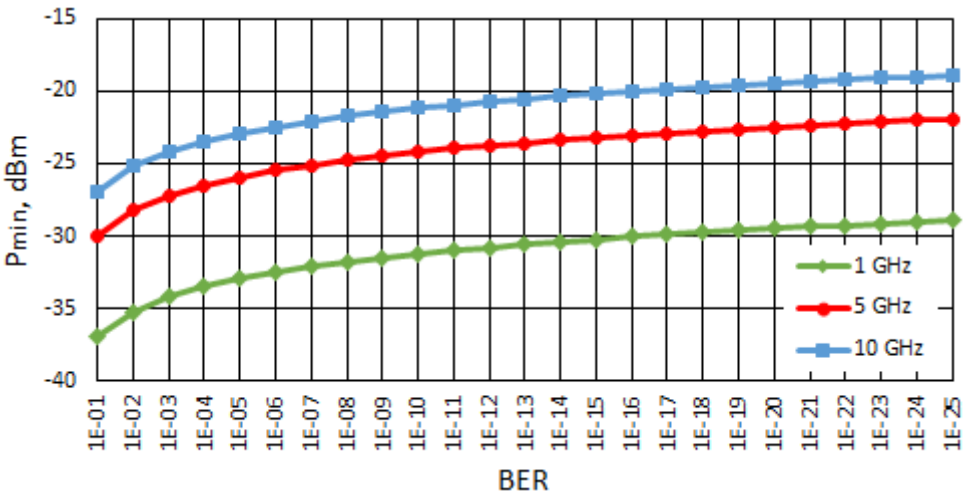


Рис. 2. Залежність мінімальної потужності приймача від БКП за різних частот

В інфокомунікаційних протоколах SONET/SDH необхідно, щоб при використанні довгої псевдовипадкової послідовності двійкових символів (біт) кількість помилок була не більше 1×10^{-10} біт. В протоколах передачі цифрових даних типу Ethernet при використанні коротких пакетів біт BER повинен становити більше 10^{-12}.

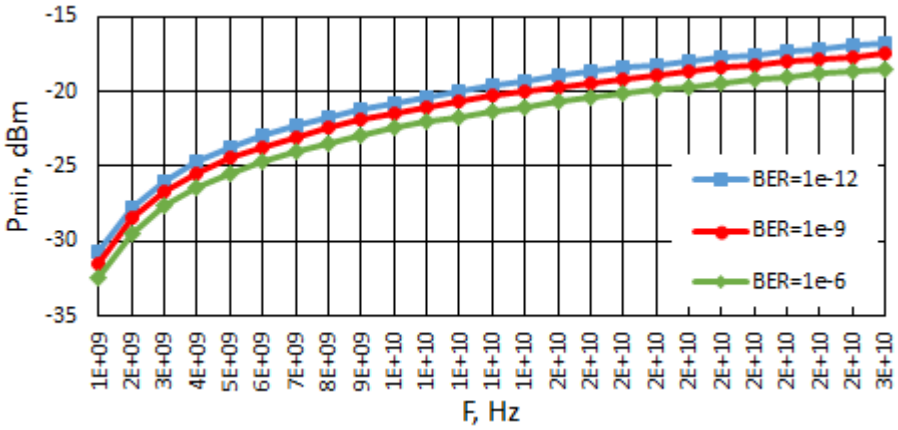


Рис. 3. Залежність мінімальної потужності приймача від частоти при різних значеннях БКП

Таблиця 1

Необхідна тривалість безпомилкового тестування системи зв'язку

BER	100 Гбіт/с	40 Гбіт/с	10 Гбіт/с	2,5 Гбіт/с
10^{-10}	0,5 с	1 с	3 с	12 с
10^{-12}	1 хв	1,3 хв	5 хв	20 хв
10^{-14}	1,1 год	2,1 год	8,4 год	1,4 дні

Швидкість передачі інформації пов'язана із смугою частот (Δf), тому в реальних умовах функціонування ЦСП потрібно визначити необхідний час тестування системи, що працює безпомилково. Статистичними методами доведено, що для досягнення рівня достовірності тестування в 95% потрібно формувати послідовність символів, що в три рази буде перевищувати зворотну величину *BER*, тобто $1/BER^n$.

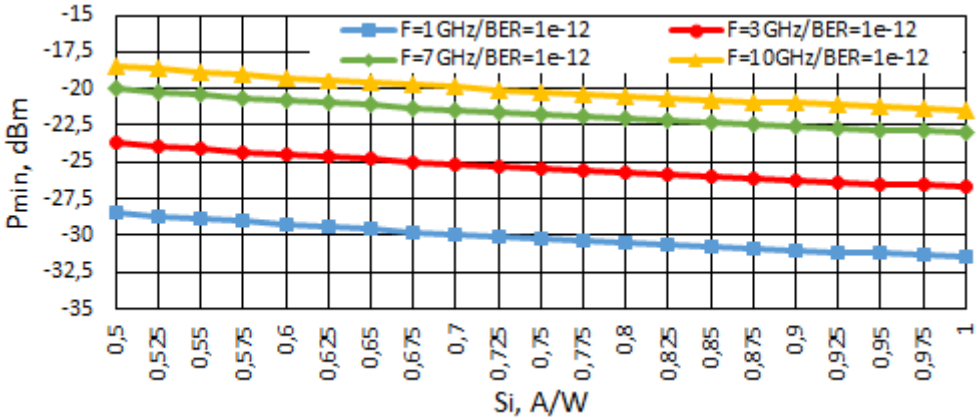


Рис. 4. Залежність мінімальної потужності приймача від струмової чутливості при різних частотах при БКП=10^{-12}

Висновки

Висока ефективність засобів оцінювання БКП базується на низці таких принципів побудови: функціональність, інтегрованість у систему, нарощуваність функціональної складності, системний підхід та оптимізація. Системний підхід та оптимізація є основними принципами побудови засобів оцінювання БКП. При цьому системний підхід передбачає побудову пристрою на вищому рівні структурної ієрархії з урахуванням результатів побудови на нижчих рівнях. Оптимальний синтез пристрою оцінювання БКП полягає у розроблені схем, що забезпечують максимальний динамічний діапазон та роздільну здатність, а також високу стійкість оцінок БКП у заданій смузі частот.

Наведено результати експериментального дослідження засобів оцінювання БКП у телекомунікаційних системах, які підтвердили коректність отриманих виразів для визначення енергетичних характеристик ВОЛЗ.

Література

1. Бортник Г.Г. Методи та засоби оцінювання параметрів абонентських ліній зв'язку / Г.Г. Бортник, В.М. Кичак, В.Ф. Яблонський. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006. – 139 с.

2. Бортник Г.Г. Метод оцінювання детермінованих складових фазового дрижання у цифрових системах передавання / Г.Г. Бортник, М.В. Васильківський, О.Г. Бортник // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2012. – № 3. – С. 45–48.

3. Бортник Г.Г. Аналіз методів оцінювання джитеру в телекомунікаційних системах / Г.Г. Бортник, М.В. Васильківський, М.Л. Мінов // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2007. – № 1. – С. 169–175.

4. Бортник Г.Г. Системи передавання в електрозв'язку : навчальний посібник / Г.Г. Бортник, О.А. Семенюк, О.В. Стальченко. – Вінниця : ВНТУ, 2006. – 138 с.

5. Васильківський М.В. Захист інформації у волоконно-оптичних лініях зв'язку / М. В. Васильківський, Р. П. Паламарчук // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах : матеріали XVII міжнар. наук.-техн. конференції (8–13 червня 2018 р., м. Одеса) ; Одес. нац. акад. зв'язку ім. О. С. Попова. – Одеса, 2018. – С. 209–211.

6. Зингеренко Ю.А. Оптические цифровые телекоммуникационные системы и сети синхронной цифровой иерархии : учебное пособие / Ю. А. Зингеренко. – СПб : НИУ ИТМО, 2013. – 393 с.

References

1. Bortnyk H.H. Metody ta zasoby otsiniuvannia parametriv abonentskykh linii zviazku / H.H. Bortnyk, V.M. Kychak, V.F. Yablonskyi. – Vinnytsia : UNIVERSUM-Vinnytsia, 2006. – 139 s.

2. Bortnyk H.H. Metod otsiniuvannia determinovanykh skladovykh fazovoho dryzhannia u tsyfrovykh systemakh peredavannia / H.H. Bortnyk, M.V. Vasylkivskyi, O.H. Bortnyk // Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh. – 2012. – № 3. – S. 45–48.

3. Bortnyk H.H. Analiz metodiv otsiniuvannia dzhyteru v telekomunikatsiinykh systemakh / H.H. Bortnyk, M.V. Vasylkivskyi, M.L. Minov // Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh. – 2007. – № 1. – S. 169–175.

4. Bortnyk H.H. Systemy peredavannia v elektrozviazku : navchalnyi posibnyk / H.H. Bortnyk, O.A. Semeniuk, O.V. Stalchenko. – Vinnytsia : VNTU, 2006. – 138 s.

5. Vasylkivskyi M.V. Zakhyst informatsii u volokonno-optychnykh liniiakh zviazku / M. V. Vasylkivskyi, R. P. Palamarchuk // Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh : materialy XVII mizhnar. nauk.-tekhn. konferentsii (8–13 chervnia 2018 r., m. Odesa) ; Odes. nats. akad. zviazku im. O. S. Popova. – Odesa, 2018. – S. 209–211.

6. Zingerenko Ju.A. Opticheskie cifrovye telekommunikacionnye sistemy i seti sinhronnoj cifrovoj ierarhii : uchebnoe posobie / Ju. A. Zingerenko. – SPb : NIU ITMO, 2013. – 393 s.

Рецензія/Peer review : 21.1.2019 р. Надрукована/Printed :15.2.2019 р.
Рецензент: к.т.н., проф. Бортнік Г.Г.

DOI 10.31891/2307-5732-2019-269-1-220-231
УДК 389:681.2

В.Т. КОНДРАТОВ
Институт кибернетики им. В.М. Глушкова, г. Киев

ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ МЕТРОЛОГИЯ: БИКОЛЬЦОИДЫ И КОЛЬЦОИДЫ — ПЛОСКИЕ ВЕЩЕСТВЕННЫЕ АЛГЕБРАИЧЕСКИЕ КРИВЫЕ ШЕСТОГО ПОРЯДКА

В работе дальнейшее развитие и исследование получили плоские вещественные алгебраические кривые шестого порядка — бикольцоиды и кольцоиды, используемые при решении задач теории и практики магнитополевых измерений, описании траектории движения отрицательно заряженных квазичастиц внутри механической системы замкнутого типа и совершаемой ими работе на отдельных участках этого пути. Построены графики бикольцоид и кольцоид с разными параметрами, графики левосторонней и правосторонней кольцоид, приведены условия и ограничения по их воспроизведению с помощью ППП Grapher 7.0. Работа представляет интерес для метрологов, специалистов, магистров и аспирантов, изучающих кривые шестого порядка и возможности их применения в метрологии.

Ключевые слова: кривые шестого порядка, аналитическое выражение, кольцоида, бикольцоида.

V.T. KONDRATOV
V.M. Glushkov Institute of Cybernetics of National Academy of Science of Ukraine

FUNDAMENTAL METROLOGY: BIRINGOIDS AND RINGOIDS — FLAT MATERIAL ALGEBRAIC CURVES OF THE SIXTH ORDER

In the paper the further development and research have received flat material algebraic curves of the sixth order — biringoids and ringoids. It is ascertained, that the problem «about a parity between algebraic formulas and geometrical images» is one of fundamental problems of mathematics. The author in the world proves for the first time existence of flat material algebraic curves of the sixth order — biringoids and their special cases: link sided and right-hand ringoids the opened and closed types and other curves received at set restrictions of parameters of binary function of transformation and a range of change by a variable x_i *. For the first time in the world analytical expressions of flat material algebraic curves of the sixth order are deduced, the beginning is necessary to their researches and development. Demand the further research of the restrictions imposed on topology of a curve of the sixth order by directly its algebraic nature. Development of flat material algebraic curves of the sixth order is caused by necessity of the description of an average trajectory of movement negatively charged* quasiparticles *in mechanical system of the closed type and definition of made work on separate sites of this way at the decision of problems of the theory and practice magnetic-field measurements. In paper possibility of reception of curves both closed, and opened kinds is shown. Flat material algebraic curves of 6th order — biringoid, link sided and right-hand ringoids with different parameters are constructed, conditions and restrictions on their reproduction by means of the Grapher 7.0 are resulted. For the first time in metrology classification bikoltsoids which in enough full measure reflects all variety of flat material algebraic curves of 6th order is developed and resulted. Paper has scientific and practical value as promotes the decision of technical problems of the description of movement and others negatively charged* quasiparticles *in wave guides specified above a configuration.*

Schedules of bikoltsoids and ringoids with different parameters, schedules link sided and right-hand ringoids are constructed, conditions and restrictions *on their reproduction by means of the Grapher 7.0 are resulted. Work is of interest for metrologists, experts, masters and the post-graduate students studying curves of the sixth order and possibility of their application in metrology.*

Keywords: curves of the sixth order, analytical expression, biringoid, ringoid.

Введение. Одной из фундаментальных проблем математики является проблема «о соотношении между алгебраическими формулами и геометрическими образами». Несмотря на простоту и важность этой проблемы, в том числе и для многочисленных ее приложений, она до сих пор не решена [1]. В метрологии, как и в математике, также существуют проблемы построения геометрических образов плоских фигур с помощью вещественных алгебраических кривых заданной степени с предписанным расположением компонент этих фигур.

Согласно [2], в изучении топологии вещественных алгебраических кривых выделяют два естественных направления исследований: 1) поиск и установление ограничений, налагаемых на топологию кривой непосредственно ее алгебраической природой, и 2) доказательство существования плоских вещественных алгебраических кривых, удовлетворяющих этим ограничениям.

Существенный вклад в развитие данных направлений в алгебраической топологии, особенно в развитие контролируемых изменений топологий, внесли О.Я. Виро, Д.А. Гудков, В.И. Арнодльд и др. [1–4].

В течение последних 10 лет особое внимание стало уделяться доказательству существования и развитию топологии плоских вещественных алгебраических кривых.

Плоская алгебраическая кривая — это геометрическое место точек на плоскости (O; *x*, *y*), которое определяется как множество нулей многочлена от двух переменных. Порядком (или степенью) *n* этой кривой называется степень этого многочлена. Алгебраические кривые степеней *n* = 1, 2, 3, … , 8 кратко называются, соответственно, прямыми, кониками, кубиками, квартиками, пентиками, секстиками, септиками, октиками [5].

Часто кривым 3-го порядка и выше присваивается имя автора, впервые получившего и рассмотревшего эту кривую. Например, лемнисектата Жероно (2-го порядка), циссоида Диокла (3-го порядка), лемниската Бернулли (4-го порядка), лемниската Бута (4-го порядка), улитка Паскаля (4-го

порядка), овал Кассини (5-го порядка) и др. [5].

В настоящей работе дальнейшее развитие и исследование получили кривые шестого порядка — биколь-цоида и кольцоида[1], используемые, в частности, для решения задач теории и практики магнитополевых измерений, — для описания пути или траектории движения отрицательно заряженных квазичастиц в теле механической системе замкнутого типа, и для определения совершаемой ими работы на отдельных участках этого пути.

Приведены варианты построения графиков бикольцоид с разными параметрами, графиков левосторонней и правосторонней кольцоид, изложены условия и ограничения по воспроизведению плоских вещественных кривых с помощью ППП Grapher 7.0.

Объектом исследований являются плоские вещественные алгебраические кривые шестого порядка.

Предметом исследований являются бикольцоиды и кольцоиды — кривые шестого порядка, выведенные аналитически и воспроизведенные автором.

Целью работы является построение в прямоугольной системе шкал бикольцоид и кольцоид по полученным аналитическим выражениям (уравнениям величин).

Результаты исследований

1. *Вывод уравнения величин бикольцоиды*

На рис. 1 приведен чертеж механической системы замкнутого типа — двухконтурного волновода, на котором пунктирной линией изображена замкнутая кривая шестого порядка — бициклоида. Поставлена задача вывода аналитического выражения (уравнения величин), описывающего данную кривую и получение графического отображения этой кривой с помощью ППП Grapher 7.0. Решение поставленной задачи возможно осуществить двумя методами: а) графоаналитическим и б) аналитическим.

Представим замкнутую кривую (идеальную бикольцоиду) в декартовой системе координат с указанием характеристических точек A, C_1, D_1, B, D_2 и B_2 бициклоиды, ее фокусов F_1 и F_2, длины $2\Delta r$ линейного участка C_1D_1 и C_2D_2 кривой, а также расстояния $2\Delta h$ (щели) между линиями. C_1D_1 и C_2D_2 (рис. 2, а). На рис. 2, б приведена бициклоида в прямоугольной системе шкал. Горизонтальная шкала содержит 80 делений с оцифровкой от –1,60 мм до 1,60 мм при цене деления 0,02 мм. Вертикальная шкала содержит 50 делений с оцифровкой от –1,00 мм до 1,00 мм.

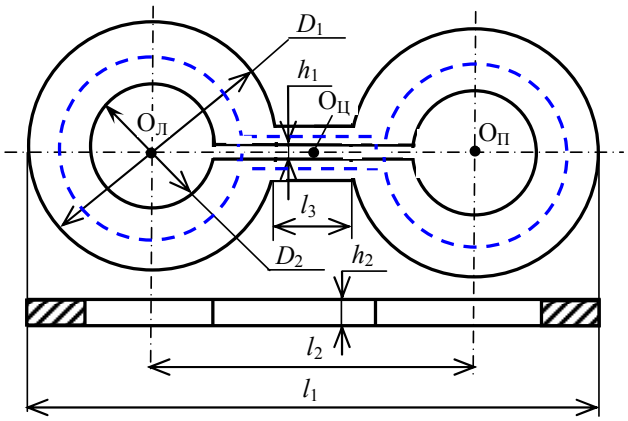
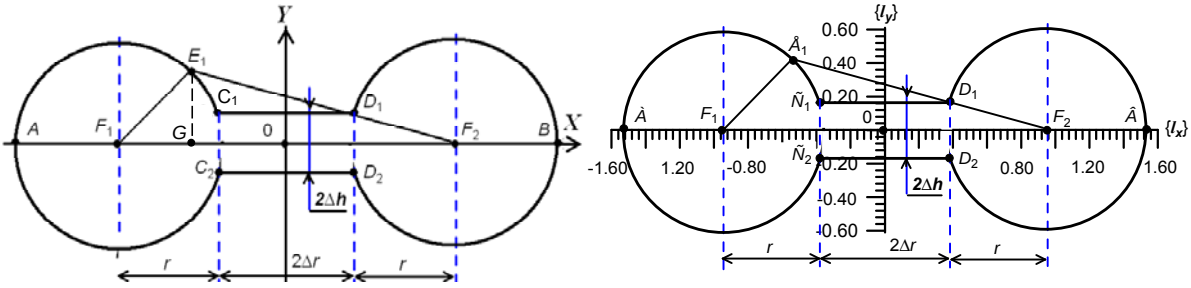


Рис. 1. Изображение бикольцоиды в виде пунктир-ной кривой на чертеже двухконтурного волновода



а б

Рис. 2. Изображение идеально симметричной бикольцоиды: а) в декартовой системе координат; б) в прямоугольной системе шкал

[1] название кривых дано автором настоящей статьи

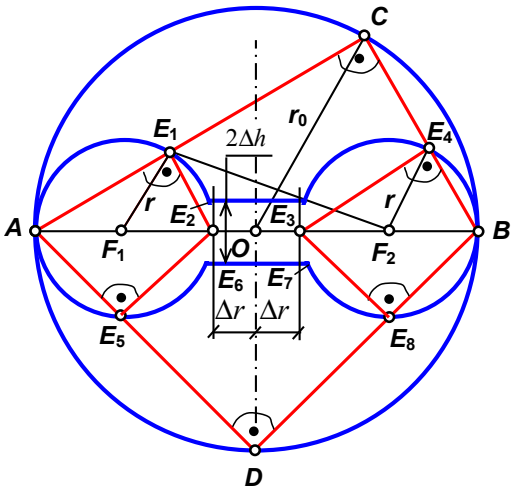


Рис. 3. Графические построения для вывода уравнения бициклоиды графоаналитическим методом

Строгие геометрические построения, обеспечивающие вывод аналитического выражения бикольцоиды, и отвечающие на вопрос, «почему две окружности встроены в третью, с нормированным по значению радиусом r_0?» имеют вид, приведенный на рис. 3. На приведенном рисунке кривая $\boldsymbol{AE_1(E_2E_3)E_4BE_8(E_7E_6)E_5A}$ представляет бикольцоиду. Жирными точками обозначены прямые углы при характеристических точках, отмеченных на окружностях буквами $\boldsymbol{A}$, $\boldsymbol{B}$, $\boldsymbol{C}$, $\boldsymbol{D}$, $\boldsymbol{E_1}$, $\boldsymbol{E_4}$, $\boldsymbol{E_8}$, $\boldsymbol{E_5}$. Они характеризуют свойства треугольников, вписанных в окружность.

Вывод уравнений величин, описывающих бикольцоиду, кольцоиду и их варианты чисто аналитическим методом оказалось не простой задачей. Более глубокий ее разбор оставим математикам.

Ниже приводится решение поставленной задачи графоаналитическим методом с использованием некоторых рекомендаций методики вывода уравнения величин, описы-вающего овал Кассини, и которая изложена в работе [6].

В общем виде координаты фокусов бикольцоиды могут быть записаны через радиус и его приращение: $F_1(-(r+\Delta r);0)$ и $F_1((r+\Delta r);0)$ (рис. 2, рис. 3). Возьмем произвольную точку $E_1(x,y)$ на левой части бикольцоиды. Определим расстояние от фокусов F_1 и F_2 до точки E_1:

$$E_1F_1=\sqrt{\left(y_i^2+\Delta h^2+(x_i-(r+\Delta r))^2\right)-\left(2x_i(r+\Delta r)\right)}$$

и

$$E_1F_2=\sqrt{\left(y_i^2+\Delta h^2+(x_i+(r+\Delta r))^2\right)+\left(2x_i(r+\Delta r)\right)}$$

Исследования показали, что при выводе уравнения величин бикольцоиды предложенным методом необходимо использовать нелинейную систему координат, — (x,y^2), в которой положение точки описывается как $E_i(x_i,y_i^2)$. В данной системе координат горизонтальная шкала линейная, а вертикальная — квадратичная.

На оси абсцисс выбранной системы координат отметим также две точки, являющиеся фокусами $F_1(-(r+\Delta r);0)$ и $F_2((r+\Delta r);0)$ двух окружностей радиуса r, смещенных относительно начала координат на расстояние $\pm(r+\Delta r)$ (рис. 2, рис. 3). Ограничим расстояние c между фокусами условием: $2(r+\Delta r)\le c\le k(r+\Delta r)$, где $k\ge 2$.

В общем виде, в выбранной системе координат уравнение окружности с центром в начале координат, при нормированном значении радиуса r_0, примет вид (см. рис. 3):

$$x_i^2+\left(y_i^2\right)^2=r_0^2. \tag{1}$$

Для двух окружностей радиуса $r_1=r_2=r$, смещенных по оси абсцисс относительно начала координат на $\pm\Delta x=\pm(r+\Delta r)$, где $\pm\Delta r$ — расстояние от центра координат до первой (левой) и второй (правой) окружности. При неизменном значении радиуса ($r_0=\text{const}$) приращение радиуса r на $\pm\Delta r$ приведет к приращению ординаты на $(\pm\Delta y)^2=\Delta y^2=\Delta h^2$, т.е. имеет место однозначное приращение ординаты на Δh^2. В выбранной системе координат уравнения величин для первой и второй окружностей с изменяющимися параметрами Δr и Δh примут вид:

$$\begin{cases} \left[(y^2+\Delta h^2)^2 + (x-(r+\Delta r))^2 \right] = r_0^2, & (2) \\ \left[(y^2+\Delta h^2)^2 + (x+(r+\Delta r))^2 \right] = r_0^2. & (3) \end{cases}$$

Проведем некоторые преобразования над полученной системой уравнений величин (2) и (3). Вначале, в левой части уравнений величин (2) и (3) возведем в квадрат разность и сумму величин, связанных с осью абсцисс, и запишем полученное аналитическое выражение в виде

$$\left.\begin{aligned} &\left[(y_i^2+\Delta h^2)^2 + (x_i^2+(r+\Delta r)^2) - (2x_i(r+\Delta r)) \right] = r_0^2 \\ &\left[(y_i^{22}+\Delta h^2)^2 + (x_i^2+(r+\Delta r)^2) + (2x_i(r+\Delta r)) \right] = r_0^2. \end{aligned}\right\}. \quad (4)$$

Сгруппируем слагаемые по «квадратичному» признаку и получим:

$$\left[(y_i^2+\Delta h^2)^2 + x_i^2 + (r+\Delta r)^2 \right] - [2x_i(r+\Delta r)] = r_0^2 \quad (5)$$

и

$$\left[(y_i^2+\Delta h^2)^2 + x_i^2 + (r+\Delta r)^2 \right] + [2x_i(r+\Delta r)] = r_0^2. \quad (6)$$

Перемножим левые и правые части равенств (5) и (6) и получим выражение для разности квадратов:

$$\left[(y_i^2+\Delta h^2)^2 + (x_i^2+(r+\Delta r)^2) \right]^2 - (2x_i(r+\Delta r))^2 = r_0^4, \quad (7).$$

которое в нелинейной системе координат связывает обе окружности с радиусом r.

Каким же образом связаны переменные x_i и y_i. между собой и с параметрами $r, \Delta r$ и Δh? Из уравнения величин (7) найдем в явном виде зависимость $y_i = f(x_i, r, \Delta r, \Delta h)$.

Перенесем вычитаемое из левой части равенства (7) в правую часть:

$$\left[(y_i^2+\Delta h^2)^2 + (x_i^2+(r+\Delta r)^2) \right]^2 = r_0^4 + (4x_i^2(r+\Delta r)^2. \quad (8)$$

Извлечем корень квадратный из обеих частей равенства (8):

$$(y_i^2+\Delta h^2)^2 + [x_i^2+(r+\Delta r)^2] = \sqrt{r_0^4 + (4x_i^2(r+\Delta r)^2}. \quad (9)$$

Перенесем вправо слагаемое в квадратных скобках:

$$(y_i^2+\Delta h^2)^2 = \sqrt{r_0^4 + (4x_i^2(r+\Delta r)^2} - x_i^2 - (r+\Delta r)^2. \quad (10)$$

Извлечем корень квадратный из обеих частей равенства (10):

$$y_i^2 + \Delta h^2 = \sqrt{\sqrt{r_0^4 + (4x_i^2(r+\Delta r)^2} - x_i^2 - (r+\Delta r)^2}. \quad (11)$$

В (11) перенесем влево второе слагаемое (Δh^2):

$$y_i^2 = \sqrt{\sqrt{r_0^4 + (4x_i^2(r+\Delta r)^2} - x_i^2 - (r+\Delta r)^2} - \Delta h^2. \quad (12)$$

Извлечем корень квадратный из обеих частей равенства (12) и получим бинарное* уравнение величин

$$y_{i1,2} = \pm\sqrt{\sqrt{\sqrt{r_0^4 + (4x_i^2(r+\Delta r)^2} - x_i^2 - (r+\Delta r)^2} - \Delta h^2}. \quad (13)$$

(со знаками «+» и «–»), описывающее бикольцоиду — плоскую вещественную алгебраическую кривую шестого порядка.

Исследования показали, что при воспроизведении кривой весьма важно указывать пределы изменения переменной x_i. В этом случае запись бинарного[1] уравнения величин (13) будет иметь вид (при x_i, изменяющейся в пределах $-x_1 \le x_i \le x_2$):

$$y_{i1,2} = \pm\sqrt{\sqrt{\sqrt{r_0^4 + (4x_i^2(r+\Delta r)^2} - x_i^2 - (r+\Delta r)^2} - \Delta h^2}\Bigg|_{-x_1}^{+x_2}. \quad (14)$$

Запишем уравнение величин (14) в самом общем виде, т.е. с учетом введенных масштабных коэффициентов k_y и k_x и смещения $\Delta y_0 = \Delta h_0$:

$$y_{i1,2} = \pm k_y\sqrt{\sqrt{\sqrt{r_0^4 + 4x_i^2(r+\Delta r)^2} - x_i^2 - (r+\Delta r)^2} - \Delta h^2} \mp \Delta h_0\Bigg|_{-x_1}^{+x_2}, \quad (15)$$

[1] два одинаковых уравнения величин с противоположными знаками, описывающие плоскую вещественную алгебраическую кривую

$$y_{i1,2} = \pm k_y \sqrt{\sqrt{\sqrt{r_0^4 + 4x_i^2 (r+\Delta r)^2} - (k_x x_i)^2 - (r+\Delta r)^2} - \Delta h^2} \mp \Delta h_0 \Bigg|_{-x_1}^{+x_2}. \quad (16)$$

$$y_{i1,2} = \pm k_y \sqrt{\sqrt{\sqrt{r_0^4 + 4(k_x x_i)^2 (r+\Delta r)^2} - (k_x x_i)^2 - (r+\Delta r)^2} - \Delta h^2} \mp \Delta h_0 \Bigg|_{-x_1}^{+x_2}. \quad (17)$$

В (15) и (16) значения масштабного коэффициента k_y не равны нулю, т.е. $0 < k_y < 1$, $k_y = 1$ или $1 < k_y < k_д$ (где $k_д$ — максимально допустимое значение масштабного коэффициента). В (17) значения масштабного коэффициента k_x отличаются от единицы на $\pm(1-3)$ цены деления соответствующей шкалы, т.е. $k_x = 1 \pm (1-3)\Delta_x$. При $\Delta_x = 0$ и $\Delta h_0 = 0$

$$y_{i1,2} = \pm k_y \sqrt{\sqrt{\sqrt{r_0^4 + (4x_i^2 (r+\Delta r)^2} - x_i^2 - (r+\Delta r)^2} - \Delta h^2} \Bigg|_{-x_1}^{+x_2}. \quad (18)$$

Аналитическое выражение уравнения величин (15) может быть записано при разных положениях масштабного коэффициента k_y перед знаками радикала. Так, например, с учетом масштабного коэффициента
k_y^2 и смещения $k_y^2 \Delta h_0$, уравнение величин (15) может быть записаны в виде::

$$y_{i1,2} = \pm \sqrt{k_y^2 \sqrt{\sqrt{r_0^4 + (4x_i^2 (r+\Delta r)^2} - x_i^2 - (r+\Delta r)^2} - k_y^2 \Delta h^2} \mp \Delta h_0 \Bigg|_{-x_1}^{+x_2}, \quad (19)$$

а с учетом масштабного коэффициента k_y^4 и смещения $k_y^2 \Delta h_0$ — в виде:

$$y_{i1,2} = \pm \sqrt{\sqrt{k_y^4 \sqrt{r_0^4 + (4x_i^2 (r+\Delta r)^2} - k_y^4 (x_i^2 + (r+\Delta r)^2)} - k_y^2 \Delta h^2} \mp \Delta h_0 \Bigg|_{-x_1}^{+x_2}. \quad (20)$$

Исследования показали существование частных уравнений величин, описывающих бикольцоиды, которые могут быть воспроизведены при разных значениях параметров уравнения величин и при неизменном (заданном) диапазоне значений переменной x_i, т.е. при $\{\Delta h_0\} = 0$ и/или $\{\Delta h\} = 0$, при $\{\Delta h_0\} = \{\Delta h\}$ и $0 \le \{\Delta h_0\} \le r/2$, при $\{\Delta h\} \ne \{\Delta h_0\}$, при $\Delta r \ne 0$ или $\Delta r = 0$. Также возможно получение множества частных случаев уравнений величин для кольцоид при разных диапазонах изменения значения переменной x_i и тех же значениях параметров, что и для бикольцоиды.

С математической точки зрения уравнения величин (14), (15), (16), (17), (18) и (19) представляют собой функции шестого порядка, описывающие вещественные алгебраические кривые того же порядка. Они получены автором впервые.

2. *Реальные изображения бикольцоид.* Реальные изображения бикольцоид, полученные с использованием ППП Grapher 7.0, отличаются от идеальных из-за неадекватности и неидеальности математической модели кривой, связанной, например, с приблизительным заданием значения параметра Δr, например, с погрешностью большей 0,1%, и ограниченных возможностей ППП Grapher 7.0 по графическому отображению скачков этой кривой.

Рассмотрим некоторые варианты бикольцоид и кольцоид (усеченных бикольцоид).

1. По размерам радиуса колец и расстояниям между кольцами можно выделить бикольцоиды трех групп: 1) при $0 \le 2\Delta r \le r$; 2) при $r \le 2\Delta r \le 2r$ и 3) при $2r \le 2\Delta r \le kr$, где $k = 3,...,10$ и даже более.

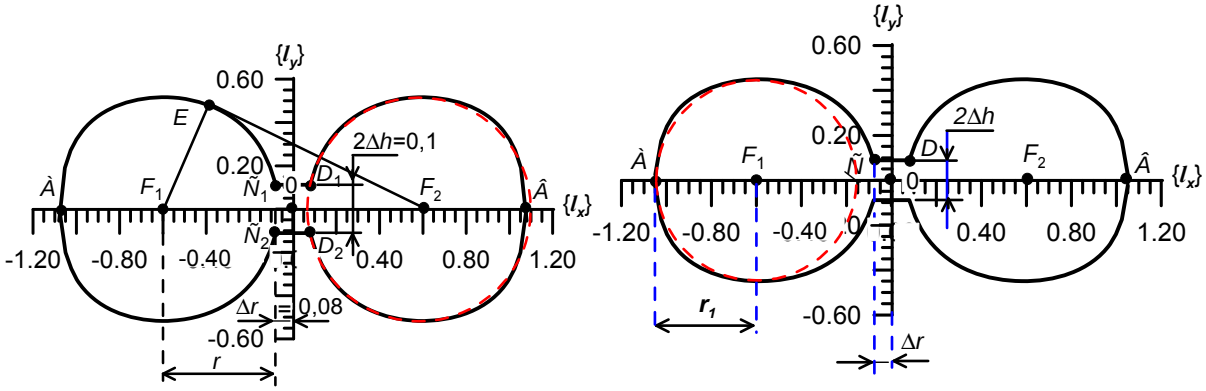
Различают: группы бикольцоид с разными значениями расстояний между кольцами (контуров), но при неизменных значениях их радиусов; группы бикольцоид с разными значениями радиусов колец, но при постоянном (неизменном) расстоянии между ними; группы бикольцоид с разными значениями радиусов и расстояний между кольцами.

Рассмотрим несколько примеров.

Пример 1. Один из вариантов бикольцоиды, описываемой уравнеием величин (15), приведен на рис. 4, Программа воспроизведения ППП Grapher 7.0 бикольцоиды, приведенной на рис. 4, а, записывается таким образом:

$$\left.\begin{array}{l} sqrt\Big(sqrt\Big(\big(sqrt\big(pow(0.39,4)+4*pow(x,2)*pow((0.45+0.15),2)\big)-pow((0.99*x),2)-pow(0.39,2)\big)\Big)-0.1\Big)-0.1 \\ -sqrt\Big(sqrt\Big(\big(sqrt\big(pow(0.39,4)+4*pow(x,2)*pow((0.45+0.15),2)\big)-pow((0.99*x),2)-pow(0.39,2)\big)\Big)-0.1\Big)+0.1 \end{array}\right\}\Bigg|_{x_1=-1,316}^{x_2=1,316}.$$

(21) Программа воспроизводит бициклоиду при $k_y = 1$, $k_x = 0,99$, $k_0 = 0,39$, $r + \Delta r = 0,45 + 0,15$, $\mp\Delta h_0 = \mp 0,1$, $\Delta h^2 = 0,39$ и $-0,316 \le x_i \le 0,316$,



а б

Рис. 4. Графическое изображение бициклоиды, отвечающей условию $0 \le 2\Delta r \le r$

На рис. 4, а латинскими буквами *A*, C_1, D_1, *B*, D_2, C_2, *A* обозначен весь путь движения, например, электронов, по замкнутому контуру бикольцоиды. То же показано и на других рисунках. Точками *F*1, *F*2 и *E*

На рис. 4, а справа, окружность, изображенная пунктирной линией, показывает степень отклонения формы
«колец» от идеальной. Как видно из рисунка, данные отклонения незначительны. Это достигнуто за счет введения масштабного коэффициента $k_x = 0,99$ при члене x^2.

Программа воспроизведения ППП Grapher 7.0 бикольцоиды, приведенный на рис. 4, б, при масштабном коэффициенте $k_y = 0,9$ и $k_x = 1$ записывается таким образом:

$$\left.\begin{array}{l} 0.9*sqrt\Big(sqrt\Big(\big(sqrt\big(pow(0.39,4)+4*pow(x,2)*pow((0.45+0.15),2)\big)-pow(x,2)-pow(0.39,2)\big)\Big)-0.10\Big)-0.1 \\ -0.9*sqrt\Big(sqrt\Big(\big(sqrt\big(pow(0.39,4)+4*pow(x,2)*pow((0.45+0.15),2)\big)-pow(x,2)-pow(0.39,2)\big)\Big)-0.10\Big)+0.1 \end{array}\right|_{x_1=-1,313}^{x_2=1,313} \quad (22)$$

В результате введения масштабирования ($k_y = 0,9$), приведенный вариант бикольцоиды имеет уменьшенный радиус колец бикольцоиды и заметную погрешность воспроизведения колец (см. рис .4, б, левую часть с окружностью, изображенной пунктирной линией).

Пример 2. На рис. 5 приведена бикольцоида, отвечающая условию $r \le 2\Delta r \le 2r$, согласно которому расстояние между кольцами не превышает удвоенного значения радиуса колец. Кроме того, кольца имеют одинаковые радиусы ($r_1 = r_2 = r$), симметричный «прямоугольный» элемент связи колец, которые смещены относительно начала координат на одинаковое расстояние, т.е. $\Delta r_1 = \Delta r_2 = \Delta r$. Бикольцоида описывается уравнением величин (15) при $r_0 = 0,6$, $r + \Delta r = 0,98 + 0,15$, $\mp\Delta h_0 = \mp 0,07$, $\Delta h^2 = 0,4$ и $-1,75 \le x_i \le 1,75$, Форма кольца незначительно отличается от идеальной окружности (см. рис. 5, окружность, изображенная пунктирной линией), что нарушает их симметрию .Подбором значений соответствующих параметров данная асимметрия может быть уменьшена или даже исключена.

Программа воспроизведения ППП Grapher 7.0 приведенной бикольцоиды имеет вид:

$$\left.\begin{array}{l} sqrt\Big(sqrt\Big(\big(sqrt\big(pow(0.6,4)+4.0*pow(x,2)*pow(0.98,2)\big)-pow(x,2)-pow(0.8,2)\big)\Big)-pow(0.4,2)\Big)-0.07 \\ -sqrt\Big(sqrt\Big(\big(sqrt\big(pow(0.6,4)+4.0*pow(x,2)*pow(0.98,2)\big)-pow(x,2)-pow(0.8,2)\big)\Big)-pow(0.4,2)\Big)+0.07 \end{array}\right|_{x_1=-1,75}^{x_2=1,75} \quad (23)$$

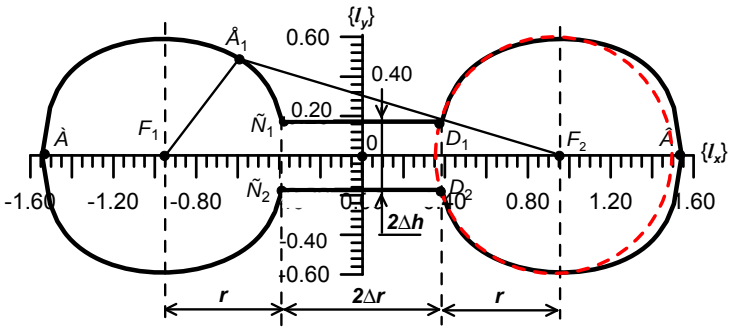


Рис. 5. Графическое изображение бикольцоиды, отвечающей условию $r \le 2\Delta r \le 2r$

Пример 3. На рис. 6 приведена бикольцоида с измененным на 5% масштабом по горизонтальной шкале значений ($x_i' = 1{,}05x_i$), Бикольцоида соответствует условиям: $2r < 2\Delta r \le 3r$ и $\Delta h_1 > \Delta h_2$. Согласно этим условиям, расстояние между кольцами превышает удвоенное значение радиуса колец, а «прямоугольный» элемент связи смещен по оси ординат вверх. Кольца имеют одинаковые радиусы ($r_1 = r_2 = r$) и размещены относительно начала координат на одинаковом расстоянии. $\Delta r > r$. Форма колец практически не отличается от идеальной.

Программа воспроизведения ППП Grapher 7.0 приведенного варианта бикольцоиды записывается в виде:.

$$\begin{aligned} &sqrt\Big(sqrt\Big(\big(sqrt\big(pow(0.6,4)+4*pow((1.05*x),2)*pow(0.98,2)\big)-pow((1.05*x),2)-pow(0.8,2)\big)-pow(0.4,2)\Big)\Big)-\mathbf{0.25} \\ &-sqrt\Big(sqrt\Big(\big(sqrt\big(pow(0.6,4)+4*pow((1.05*x),2)*pow(0.98,2)\big)-pow((1.05*x),2)-pow(0.8,2)\big)-pow(0.4,2)\Big)\Big)+\mathbf{0.29} \end{aligned} \Bigg|_{x_1=-1{,}8}^{x_2=1{,}8} \quad (24)$$

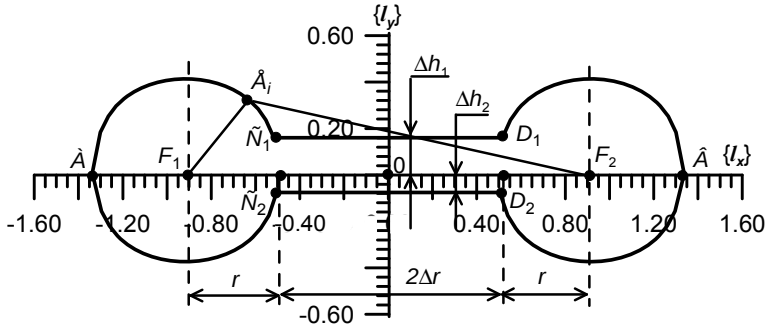


Рис. 6. Графическое изображение бикольцоиды с удлиненным путем перемещения некоторого объекта из точки *A* в точку *B*, отвечающей условию

Пример 4. На рис. 7 приведено графическое изображение сплющенной бикольцоиды, похожей на «биэллипсоиду». Изображенная плоская вещественная алгебраическая кривая 6-го порядка получена при разных значениях параметров, в частности, при $2r \le 2\Delta r$, $2\Delta h_1 < 2\Delta h_2$, $r_1 > r_2$.

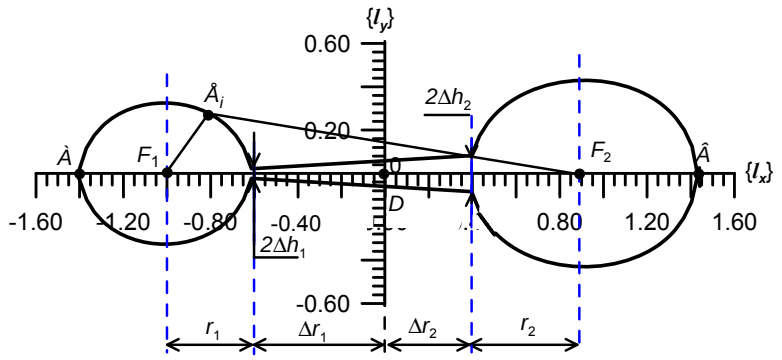


Рис. 7. Графическое изображение бикольцоиды с разной формой колец с соединением в виде конуса с вершиной слева от центра симметрии

Значения переменной x_i смещены на 0,08 и 0,05 единиц соответственно. Согласно указанным условиям, расстояние между кольцами по своему значению близко к удвоенному значению радиусов колец.

Элементом соединения колец разной формы является конус, вершина которого расположена слева от центра симметрии.

Программа воспроизведения ППП Grapher 7.0 бикольцоиды, приведенной на рис. 7, записывается в виде:

$$\begin{aligned} & sqrt\Big(sqrt\Big(\big(sqrt\big(pow(0.6,4)+4*pow((x+0.08),2)*pow(0.98,2)\big)-pow((x+0.05),2)-pow(0.8,2)\big)\Big)-0.4*\mathbf{0.44-0.196}\Big)-0.09 \\ & -sqrt\Big(sqrt\Big(\big(sqrt\big(pow(0.6,4)+4.0*pow((x+0.08),2)*pow(0.98,2)\big)-pow((x+0.05),2)-pow(0.8,2)\big)\Big)-0.4*\mathbf{0.44-0.195}\Big)+0.09 \end{aligned} \Bigg|_{x_1=-1,802}^{x_2=1,802} \quad (25)$$

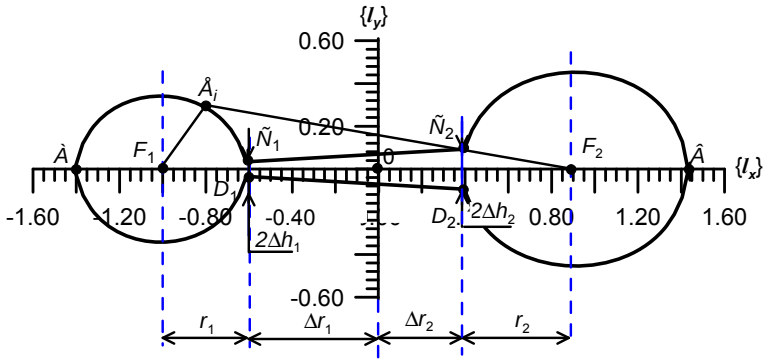


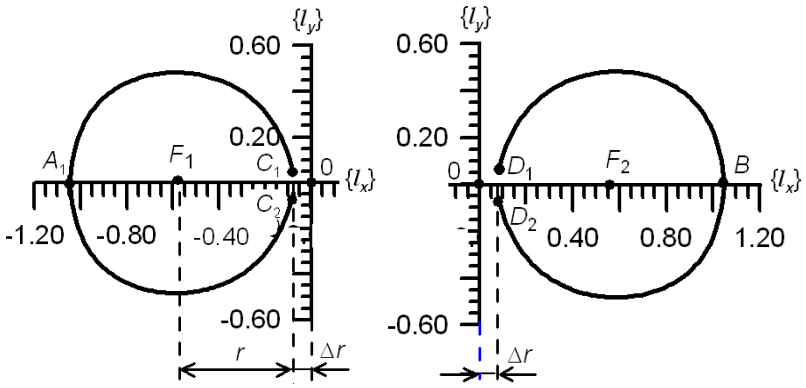
Рис. 8. Графическое изображение бикольцоиды с соединением в виде конуса с вершиной слева от центра симметрии

Если в бинарное уравнение величин (25) ввести коэффициент масштабирования $k_y = 1,08$ по вертикальной шкале и увеличить значение смещения до 0,11 единиц, то можно получить изображение бикольцоиды с более округленными кольцами (см. рис. 8) Уточненное уравнение величин примет вид:

$$\begin{aligned} & \mathbf{1.08}*sqrt(sqrt\Big(\big(sqrt\big(pow(0.6,4)+4.0*pow((x+0.08),2)*pow(0.98,2)\big)-pow((x+0.05),2)-pow(0.8,2)\big)-0.4*0.44-0.196\Big)-\mathbf{0.11} \\ & -\mathbf{1.08}*sqrt\Big(sqrt\Big(\big(sqrt\big(pow(0.6,4)+4*pow((x+0.08),2)*pow(0.98,2)\big)-pow((x+0.05),2)-pow(0.8,2)\big)\Big)-0.4*0.44-0.195\Big)+\mathbf{0.11} \end{aligned} \Bigg|_{x_1=-1,802}^{x_2=1,802} \quad (26)$$

Рассмотрим еще два примера изображения левосторонней и правосторонней кольцоид разомкнутого и замкнутого типов, как частных случаев бикольцоиды.

Пример 5. На рис. 9 приведены два частных случая левосторонней и правосторонней кольцоид разомкнутого типа. Они получены путем ограничения нижнего и верхнего значений диапазона изменения переменной x_i. Для построения левосторонней и правосторонней кольцоид использовалось уравнение величин (15) при $k_y = 1,08$, $k_x = 0,99$, $k_0 = 0,39$, $r + \Delta r = 0,45 + 0,15$, $\mp\Delta h_0 = \mp 0,177$ и $\Delta h^2 = 0,1$. Причем для левосторонней кольцоиды значения переменной ограничиваются диапазоном значений $-0,078 \le x_i \le -0,41$, а для правосторонней — $0,08 \le x_i \le 1,35$.



а б

Рис. 9. Графическое изображение левосторонней (а) и правосторонней (б) кольцоид разомкнутого типа

Программы воспроизведения левосторонней и правосторонней кольцоид, приведенных на рис. 9, а, имеют, соответственно, вид:

$$\left.\begin{array}{l} 1.08*sqrt\Big(sqrt\Big(\big(sqrt\big(pow(0.39,4)+4*pow(x,2)*pow((0.45+0.15),2)\big)-pow(x,2)-pow(0.39,2)\big)\Big)-0.10\Big)-0.177 \\ -1.08*sqrt\Big(sqrt\Big(\big(sqrt\big(pow(0.39,4)+4*pow(x,2)*pow((0.45+0.15),2)\big)-pow(x,2)-pow(0.39,2)\big)\Big)-0.10\Big)+0.177 \end{array}\right\}\Bigg|_{x_1=-1,41}^{x_2=-0,078} \quad (27)$$

и

$$\left.\begin{array}{l} 1.08*sqrt\Big(sqrt\Big(\big(sqrt\big(pow(0.39,4)+4*pow(x,2)*pow((0.45+0.15),2)\big)-pow(x,2)-pow(0.39,2)\big)\Big)-0.10\Big)-0.177 \\ -1.08*sqrt\Big(sqrt\Big(\big(sqrt\big(pow(0.39,4)+4*pow(x,2)*pow((0.45+0.15),2)\big)-pow(x,2)-pow(0.39,2)\big)\Big)-0.10\Big)+0.177 \end{array}\right\}\Bigg|_{x_1=0,08}^{x_2=1,35} \quad ..(28)$$

Как видно из рис. 9, левосторонняя м правосторонняя кольцоиды незамкнутого типа отличаются между собой, при прочих равных условиях (см. аналитические выражения (27) и (28)), расположением и размерами $2\Delta h$ разрывной части кривой («щели»). Последние получают путем установления в (27) и (28) начального значения переменной x_2 и x_1 соответственно.

Пример 6. На рис 10 приведены изображения левосторонняя и правосторонняя кольцоиды замкнутого типа. Как и в предыдущем примере, они получены путем ограничения нижнего и верхнего значений диапазона изменений переменной x_i в пределах от –1,313 до –0,053 и от 0,053 до 1,313 .

Для построения левосторонней и правосторонней кольцоид замкнутого типа использовалось уравнение величин (15) при $k_y = 1,08$, $k_x = 1$, $k_0 = 0,39$, $r + \Delta r = 0,45 + 0,15$, $\mp\Delta h_0 = \mp 0,17$ и $\Delta h^2 = 0,1$.

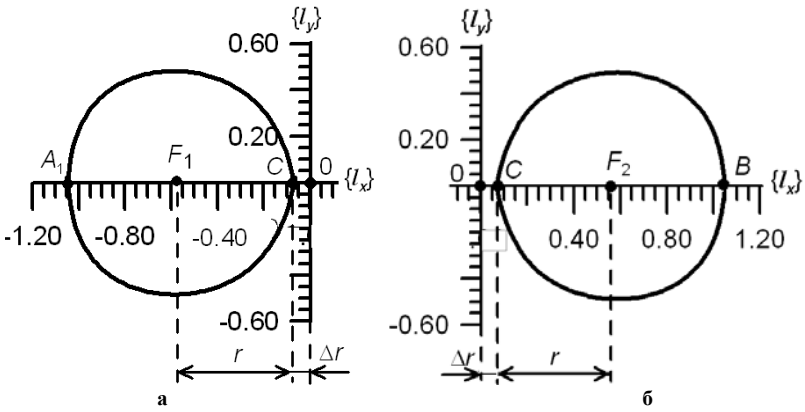


Рис. 10. Графическое изображение левосторонней (а) и правосторонней (б) кольцоид замкнутого типа

Программы воспроизведения левосторонней и правосторонней кольцоид, приведенных на рис. 10, имеют, соответственно, вид:

$$\left.\begin{array}{l} 1.08*sqrt(sqrt((sqrt(pow(0.39,4)+4*pow(x,2)*pow((0.45+0.15),2))-pow(x,2)-pow(0.39,2)))-0.1)-0.17 \\ -1.08*sqrt\Big(sqrt\Big(\big(sqrt\big(pow(0.39,4)+4*pow(x,2)*pow((0.45+0.15),2)\big)-pow(x,2)-pow(0.39,2)\big)\Big)-0.1\Big)+0.17 \end{array}\right|_{x_1}^{x_2} \quad (29)$$

Причем для левосторонней кольцоиды значения переменной ограничиваются диапазоном значений $-1,30 \le x_i \le -0,52$, а для правосторонней — $0,052 \le x_i \le 1,30$.

Возможны и другие частные случаи бикольцоид и кольцоид, которые могут представлять тот или иной научный и практический интерес для метрологов и математиков.

Следует отметить сложность настройки и доведения графического изображения до требуемого качества, формы и вида. Не изученными остаются вопросы установления пределов задания переменных величин, вопросы взаимосвязей постоянных величин между собой и с переменными величинами. Для плоских вещественных алгебраических кривых шестого порядка ее изученными остаются ограничения, налагаемые на топологию кривой непосредственно ее алгебраической природой.

Таким образом, впервые в мире доказано существование плоских вещественных алгебраических кривых шестого порядка — бикольцоид и их частных случаев: левосторонней и правосторонней кольцоид разомкнутого и замкнутого типов и других кривых, полученных при заданных ограничениях параметров бинарных уравнений величин (бинарных функций преобразования) и диапазона изменения значений переменной x_i.

Полученные данные позволяют предложить классификацию плоских вещественных алгебраических кривых 6-го порядка.

4. ***Классификация бикольцоид.*** Впервые предложена классификация бикольцоид (см. рис. 11), в основу которой положено ряд существенных классификационных признаков. Рассмотрим используемые

признаки при описании классификации бикольцоид.

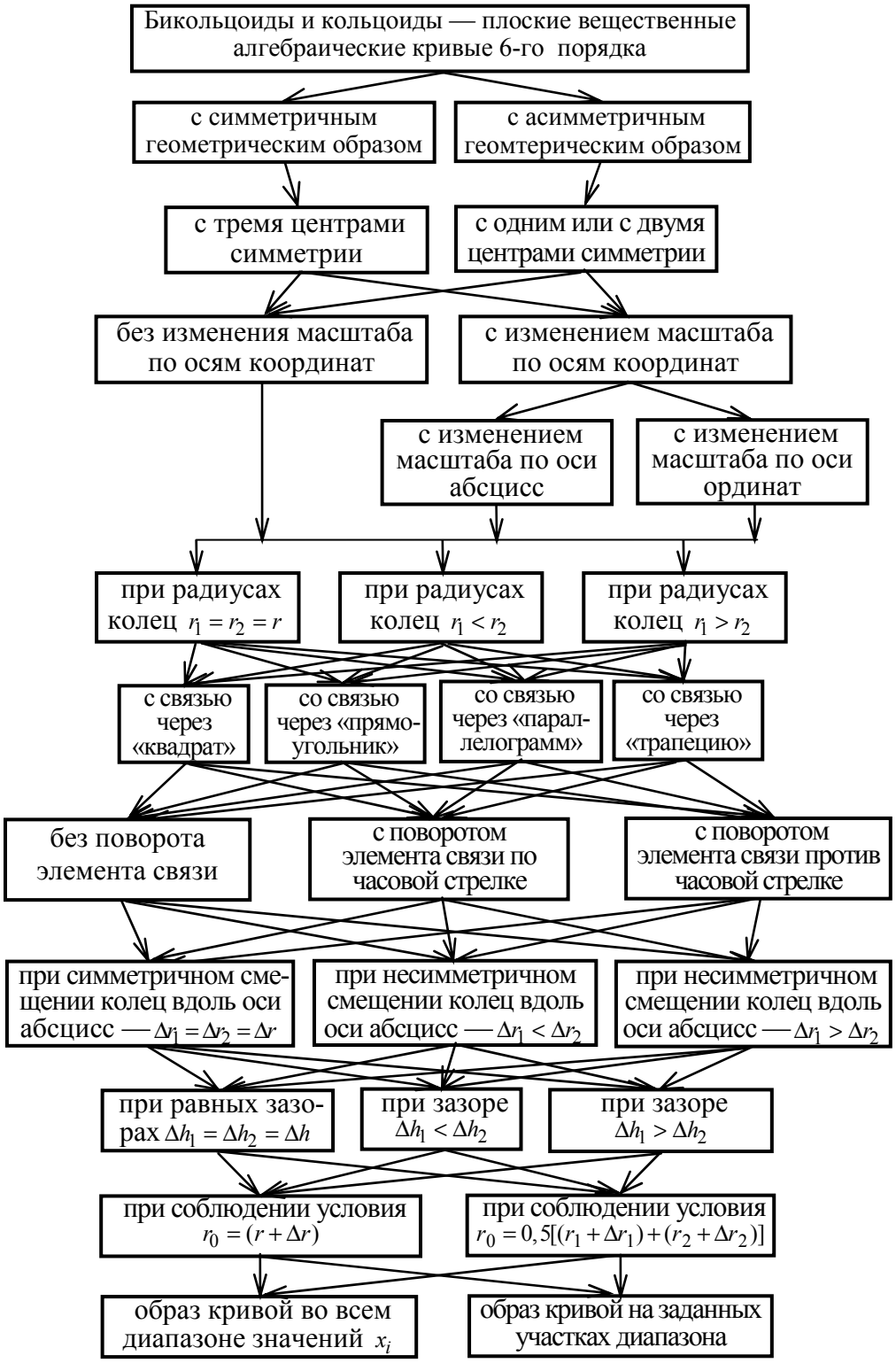


Рис. 11. Классификация бикольцоид

Известно [7], что законы природы управляют неисчерпаемой в своем многообразии картиной физических явлений. Эти законы, в свою очередь, подчиняются принципам симметрии. Симметрия, согласно Дж. Ньюмену, устанавливает забавное и удивительное родство между предметами, явлениями и теориями. Слово „симметрия“ имеет двойственное толкование. В одном смысле симметричное означает нечто весьма пропорциональное, сбалансированное; симметрия показывает тот способ согласования многих частей, с помощью которого они объединяются в целое. Второй смысл этого слова — равновесие [7].

В сознании человека и в природе существуют две группы симметрий: геометрическая и физическая. К первой (видимой) группе симметрии относится симметрия положений, форм, структур. Вторая (не водимая) группа симметрии характеризует симметрию физических явлений и законов природы и лежит

в основе естественнонаучной картины мира.

В этой связи целесообразным является использование признаков «симметрия геометрического образа (фигуры)» и «асимметрия геометрического образа (фигуры)» для характеристики бикольцоиды — вещественной алгебраической кривой шестого порядка, имеющей определенный геометрический образ (см. рис. 2).

Поскольку симметрия всегда связана с центрами симметрии, то различают бикольцоиды, как геометрический образ, с полной симметрией (с тремя центрами симметрии) и с неполной симметрией (асимметричные, с отсутствием одного или двух центров симметрии).

Каждая бикольцоида в прямоугольной системе координат или шкал описывается определенным уравнением величин. Их форма зависит от наличия или отсутствия масштабирования по осям координат. В этой связи в описываемой классификации выделены признаки, связанные с изменением масштаба по осям координат: «без изменения масштаба по осям координат» и «с изменением масштаба по осям координат».

В последнем случае дополнительно выделено еще два различительных признака: «с изменением масштаба по оси абсцисс или по оси ординат» (рис. 11).

Дальнейшее разделение бикольцоид осуществляется по следующим классификационным признакам: «соотношения между радиусами колец», т.е. равные или неравные между собой радиусы колец ($r_1 = r_2 = r$, $r_1 < r_2$, $r_1 > r_2$). Это соотношение приводит к формированию симметричного ($r_1 = r_2 = r$) или асимметричного ($r_1 < r_2$, $r_1 > r_2$) геометрического образа бикольцоиды относительно основного центра симметрии — центра координат (рис. 2, а) или центра пересечения шкал (рис. 2, б).

Геометрический образ бикольцоиды рассматривается как соединенные между собой два кольца. Как показали исследования, элементом соединения колец могут быть плоские фигуры: квадрат, прямоугольник, параллелограмм или трапеция. В этой связи выделен такой классификационный признак, как «тип связей между кольцами». По этому признаку различают образы бикольцоид со связью через квадрат, прямоугольник, параллелограмм или трапецию. Эти группы бикольцоид делятся, в свою очередь, по признаку «направление наклона элемента связи». Различают подгруппы бикольцоид с указанными типами связей без наклона и с наклоном элемента связи по или против часовой стрелки (см. рис. 11).

Так, например, трапеция, как элемент связи между кольцами, расположенная вдоль оси абсцисс, имеет сужение с левой или с правой стороны относительно оси ординат. В этой связи будем различать правостороннюю и левостороннюю трапеции. По признаку «направление сужения элемента связи “трапеция”» могут быть выделены подгруппы бикольцоид с правосторонней и с левосторонней трапециями. По признаку «направление наклона элемента связи» бикольцоиды с данным типом связей делятся на бикольцоиды без поворота и с поворотом относительно оси абсцисс по или против часовой стрелки (см. рис. 11).

Исследования двузначного уравнения величин (9), описывающего бикольцоиду, показал, что возможно получение графических образов бикольцоид с симметричным и асимметричным расположением (смещением) колец вдоль оси абсцисс относительно начала координат на расстоянии Δr_1 от края левого кольца и Δr_2 — от края правого кольца до точки пересечения осей координат (рис. 11). В этой связи выделен классификационный признак «симметрия расположения колец относительно начала координат». По данному признаку все бикольцоиды можно разделить на те, у которых кольца расположены на одинаковых расстояниях от начала координат, т.е. отвечающие условию $\Delta r_1 = \Delta r_2 = \Delta r$, и на разных расстояниях, т.е. отвечающие условиям $\Delta r_1 > \Delta r_2$ и $\Delta r_1 > \Delta r_2$. Обозначение расстояния или смещения по оси абсцисс через Δr обусловлено привязкой его к длине радиуса для удобства вывода уравнений величин.

Еще одним параметром уравнения величин бикольцоиды, влияющим на ее полную симметрию, является так называемый «зазор» (или «щель») по оси ординат или высота Δh элементов связи двух колец. Это обусловило выделение такого классификационного признака, как «соразмерность (симметрия) расположения элементов соединения колец относительно оси абсцисс». По данному признаку бикольцоиды делятся на те, у которых зазор симметричен, .т.е. выполняется условие $\Delta h_1 = \Delta h_2 = \Delta h$, характерное для бикольцоид с цилиндрическим типом связи, и на те, у которых зазор асимметричен, т.е. выполняются условия: $\Delta h_1 > \Delta h_2$ и $\Delta h_1 > \Delta h_2$, которые характерны для конусного типа связей.

Дополнительно введен признак «выполнение условий $r_0 = r + \Delta r$ и $r_0 = 0,5[(r_1 + \Delta r_1) + (r_2 + \Delta r_2)]$», характеризующих равенство или неравенство радиусов колец и их связь с нормированным по значению радиусом r_0.

И, наконец, по признаку «полнота геометрического образа бикольцоиды»», будем различать бикольцоиды с полной симметрией геометрического образа и с частичным нарушением симметрии. К последним отнесем и усеченные слева и справа от оси ординат геометрические образы бикольцоид. Среди них следует упомянуть левостороннюю и правостороннюю кольцоиду (рис. 9 и рис. 10).

Представленная классификация отражает все многообразие геометрических образов плоской вещественной алгебраической кривой шестого порядка — бикольцоиды.

Выводы. Проблема «о соотношении между алгебраическими формулами и геометрическими

образами» является одной из фундаментальных проблем математики.

В метрологии, как и в математике, также существуют проблемы построения геометрических образов плоских фигур с помощью вещественных алгебраических кривых заданной степени с предписанным расположением компонент этих фигур. Математики решили указанные проблемы только для кривых 2-5 порядка.

Нами впервые в мире доказано существование плоских вещественных алгебраических кривых шестого порядка — бикольцоид и их частных случаев: левосторонней и правосторонней кольцоид разомкнутого и замкнутого типов и других кривых, полученных при заданных ограничениях параметров бинарной функции преобразования и диапазона изменения переменной x_i .

Впервые в мире выведены аналитические выражения плоских вещественных алгебраических кривых шестого порядка, положено начало их исследованиям и развитию.

Требуют дальнейшего исследования ограничений, налагаемых на топологию кривой шестого порядка непосредственно ее алгебраической природой.

Развитие плоских вещественных алгебраических кривых шестого порядка обусловлено необходимостью описания усредненной траектории движения отрицательно заряженных квазичастиц внутри механической системы замкнутого типа и определения совершаемой работы на отдельных участках этого пути при решении задач теории и практики магнитополевых измерений.

Показана возможность получения кривых как замкнутого, так и разомкнутого видов.

Построены плоские вещественные алгебраические кривые 6-го порядка — бикольцоиды, левосторонние и правосторонние кольцоиды с разными параметрами, приведены условия и ограничения по их воспроизведению с помощью ППП Grapher 7.0.

Впервые в метрологии разработана и приведена классификация бикольцоид, которая в достаточно полной мере отражает все многообразие плоских вещественных алгебраических кривых 6-го порядка.

Работа имеет научное и практическое значение, поскольку способствует решению технических задач описания движения электронов и других отрицательно заряженных квазичастиц в волноводах указанной выше конфигурации.

Литература

1. Арнольд В. И. Вещественная алгебраическая геометрия / Арнольд В. И. – М. : МЦНМО, 2009. – 88 с.

2. Виро О.Я. Плоские вещественные алгебраические кривые: построения с контролируемой топологией [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://www.math.stonybrook.edu/~oleg/math/papers/1989-PloVeAlgKr-postr.pdf.

3. Элементарная топология [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://dxdy.ru/topic24524.html.

4. Гудков Д. А. Построение кривой 6-го порядка типа $\frac{5}{1}5$ [Электронный ресурс] / Д. А. Гудков // Изв. вузов. Матем. – 1973. – № 3. – С. 28–36. – Режим доступа : http://www.mathnet.ru/links/8a54f24c0c2a8d70702a9ae69368360e/ivm4418.pdf.

5. Овал Кассини [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9E%D0%B2%D0%B0%D0%BB_%D0%9A%D0%B0%D1%81%D1%81%D0%B8%D0%BD%D0%B8.

6. Алгебраическая кривая [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BB%D0%B3%D0%B5%D0%B1%D1%80%D0%B0%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%8F_%D0%BA%D1%80%D0%B8%D0%B2%D0%B0%D1%8F.

7. Симметрия [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.milogiya2007.ru/simmetr01.htm.

References

1. Arnol'd V. I. Veshhestvennaja algebraicheskaja geometrija / Arnol'd V. I. – M. : MCNMO, 2009. – 88 s.

2. Viro O.Ja. Ploskie veshhestvennye algebraicheskie krivye: postroenija s kontroliruemoj topologiej [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : https://www.math.stonybrook.edu/~oleg/math/papers/1989-PloVeAlgKr-postr.pdf.

3. Jelementarnaja topologija [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : https://dxdy.ru/topic24524.html.

4. 4. Gudkov D. A. Postroenie krivoj 6-go porjadka tipa [Jelektronnyj resurs] / D. A. Gudkov // Izv. vuzov. Matem. – 1973. – № 3. – S. 28–36. – Rezhim dostupa : http://www.mathnet.ru/links/8a54f24c0c2a8d70702a9ae69368360e/ivm4418.pdf.

5. Oval Kassini [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9E%D0%B2%D0%B0%D0%BB_%D0%9A%D0%B0%D1%81%D1%81%D0%B8%D0%BD%D0%B8.

6. Algebraicheskaja krivaja [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BB%D0%B3%D0%B5%D0%B1%D1%80%D0%B0%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%8F_%D0%BA%D1%80%D0%B8%D0%B2%D0%B0%D1%8F.

7. Simmetrija [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : http://www.milogiya2007.ru/simmetr01.htm.

Рецензія/Peer review : 17.1.2019 р. Надрукована/Printed :15.2.2019 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Троцишин І.В.

DOI 10.31891/2307-5732-2019-269-1-232-238
УДК 621.395.74

Н.О. КНЯЗЄВА
Одеська національна академія харчових технологій
О.А. КНЯЗЄВ
Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова

МЕТОД ОЦІНКИ ТА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТРУКТУРНОЇ ЖИВУЧОСТІ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОЇ МЕРЕЖІ НЕВИЗНАЧЕНОЇ ТОПОЛОГІЇ

В статті зазначено, що на сучасному етапі розвитку телекомунікацій, який характеризується ускладненням структури телекомунікаційних мереж, розширенням типів надаваних сервісів, а також розвитком самоорганізованих мереж, завдання оцінки та забезпечення структурної живучості мереж невизначеної топології, в тому числі і самоорганізованих мереж, стають все більш актуальними. Показано, що вирішення проблеми забезпечення структурної живучості є одним з важливих елементів комплексної системи захисту інформації. Відзначено, що існуючі методи оцінки структурної живучості орієнтовані на застосування для мереж із заздалегідь відомою топологією і в випадках, коли структура мережі постійно змінюється, або ще не сформована, ці методи виявляються малопридатними. Запропоновано метод, що передбачає отримання оцінок структурної живучості мережі з невизначеною топологією, яка характеризується тільки параметрами – розмірністю мережі, ступенем її зв'язності, максимально допустимим рангом шляхів, що використовуються для організації зв'язку (ранг – число гілок (ділянок), що складають шлях). Метод полягає у визначенні верхньої і нижньої меж структурної живучості. Верхня межа структурної живучості формується на основі множини шляхів, які можуть використовуватися для організації зв'язків. Нижня межа – на основі множини розрізів, які поділяють використовувані шляхи. Надано вирази для визначення числа шляхів різних рангів, які можуть бути використані для обслуговування заявок, що надходять в мережу невизначеної топології, а також розрізів, які поділяють шляхи. Представлені вирази, що дозволяють визначити верхню і нижню межі структурної живучості для кожного зв'язку і мережі в цілому. Задача забезпечення необхідного рівня структурної живучості сформульована як задача лінійного програмування, в результаті вирішення якої формується оптимальна структура резерву ділянок шляхів (розрізів), з урахуванням якої і здійснюється оцінка структурної живучості мережі з невизначеною топологією. Визначено напрямки подальших досліджень.

Ключові слова: мережа невизначеної топології, структурна живучість, захист інформації, нижня та верхня межа структурної живучості, путь, розріз, структура резерву.

N. KNIAZIEVA
Odessa National Academy of Food Technologies
A. KNIAZIEV
Odessa National A.S. Popov Academy of Telecommunications

METHOD OF THE ESTIMATION AND MAINTENANCE OF STRUCTURAL SURVIVABILITY OF THE TELECOMMUNICATION NETWORK OF INDETERMINATE TOPOLOGY

In article it is noticed that at the present stage of development of telecommunications which is characterised by complication of structure of telecommunication networks and occurrence of new threats of safety of the information, expansion of types of services, and also development of the self-organised networks, a problem of an estimation and maintenance of structural survivability of networks of indetermine topology including the self-organised networks, become more and more actual. It is proved that the solution of a problem of maintenance of structural survivability is one of important elements of complex system of protection of the information. It is noticed that existing methods of an estimation of structural survivability are focused on application for networks with in advance known topology. In cases when the network structure constantly changes or it is not generated yet, these methods appear of little use. The method which provides reception of estimations of structural survivability of a network with indetermine topology which is characterised only by parametres is offered: dimension of a network, degree of its connectivity, as much as possible admissible rank of routes which are used for the communication organisation (a rank - number of branches (sites), making a route). The method is based on definition of the top and bottom borders of structural survivability. Expressions for definition of number of routes of different ranks which can be used for service of the demands arriving in a network of indetermine topology, and also sections which divide routes are presented. The presented expressions, allowing to define the top and bottom borders of structural survivability for each communication and a network as a whole. Necessity of maintenance of necessary level of structural survivability as a problem of linear programming as a result of which decision the optimum structure of a reserve of sites of routes (sections) with which account the estimation of structural survivability of a network with indetermine topology is formulated. Directions of the further researches are defined.

Keywords: *a network of indetermine topology, structural survivability, protection of information, the bottom and top border of structural survivability, a route, section, reserve structure.*

Вступ. На сучасному етапі розвитку телекомунікацій, що характеризується ускладненням структури телекомунікаційних мереж (ТКМ), розширенням типів надаваних сервісів, зростанням обсягів трафіку, що передається, розвитком самоорганізованих мереж, завдання оцінки та забезпечення живучості ТКМ набувають все більшої актуальності як в сфері проектування, так и при експлуатації ТКМ. Оскільки ТКМ відносяться до структурних систем, особливого значення для ТКМ набувають питання оцінки та забезпечення структурної живучості. Структурна живучість розглядається як можливості реконструкції, реорганізації, реконфігурації при несприятливих впливах (НВ), що дозволить створити структуру, яка забезпечує виконання критичної підмножини функцій для досягнення мети функціонування системи. До таких впливів можна віднести, серед іншого, прояви кіберзагроз, а саме наявність небажаного та/чи

несанкціонованого доступу до ТКМ різними шляхами, насамперед через втручання через мережу Інтернет та/чи через прямий доступ до мережі шляхом протиправного підключення. Ті та інші впливи можуть вчиняти суттєвої шкоди як безпосередньо живучості ТКМ, так і заподіювати більш суттєвої шкоди – скорочення працездатності мережі, крадіжки інформації та даних тощо. Таким чином все більшої актуальності набуває необхідність розробки теоретичних основ оцінки та формування підходів щодо удосконаленого забезпечення живучості ТКМ.

При розгляді структурної живучості враховується топологія мережі, міжкомпонентні зв'язки та характеристики живучості компонентів. Структурну живучість системи можна оцінювати при деяких допущеннях, які дозволяють спростити завдання оцінки й звести його до завдання аналізу зв'язності графів, оцінки імовірності формування працездатної структури у випадку НВ тощо [1–3].

Існуючі методи оцінки та забезпечення структурної живучості ТКМ орієнтовані на застосування для мереж з визначеною топологією. Проте у випадках, коли структура мережі постійно змінюється або ще не сформована в ході проектування, особливо коли мова йде про самоорганізовані мережі, ці методи виявляються малопридатними або взагалі непридатними. У цих умовах більш придатним є підхід, що припускає одержання оцінок структурної живучості ТКМ на підставі урахування лише базових структурних характеристик ТКМ – розмірності мережі, ступеня її зв'язності, максимально припустимого рангу шляхів, що використовуються для організації зв'язку, тощо (ранг – число гілок (ділянок) шляху). Таким чином, мова йде про мережу невизначеної топології, що характеризується тільки параметрами: кількістю пунктів (вузлів) і ліній зв'язку (гілок), при цьому залишається невідомим, які саме пункти мають безпосередній зв'язок.

Мета статті. Метою статті є розробка методу оцінки та забезпечення живучості мереж з відомим на визначений момент часу числом вузлів та гілок, але заздалегідь невідомою або невизначеною топологією.

Основна частина. На сьогодні методичний апарат аналізу структурної живучості мереж досить добре розроблений, існують відомі методи й моделі оцінки та забезпечення структурної живучості мереж [1–3], серед яких можна виділити універсальні, придатні для аналізу довільних мережних структур, і спеціалізовані, які враховують певні особливості аналізованої мережі й за рахунок цього дозволяють одержати більш точні оцінки.

Відомо, що оцінка показників живучості систем здійснюється аналітичними методами, які базуються на використанні логіко-імовірнісних, детермінованих і стохастичних моделей невідновлюваних і відновлюваних систем, а також методами, які засновані на використанні штучного інтелекту [1–3]. Особливе значення для ТКМ, структурних систем, набуває використання оцінок структурної живучості, заснованих на використанні потокового підходу. Саме потоковий похід дозволяє [1, 3]:

- обґрунтувати вимоги до структури ТКМ з урахуванням заданого рівня показника структурної живучості;
- вибрати кращий за показником структурної живучості проект системи з розглянутих альтернатив;
- забезпечити показникам структурної живучості максимальне значення в деякій області допустимих значень.

У роботі [4] наведений метод забезпечення структурної живучості підсистеми ТКМ із фіксованою структурою, що реалізує потоковий підхід з використанням запропонованого показника структурної живучості, який визначається на основі використання множини шляхів обслуговування заявок, що надходять у мережу, і множини розрізів, що розділяють множину шляхів.

У мережах невизначеної топології множина шляхів, які можуть бути використані для обслуговування кожної заявки, невідома, також невідома й множина розрізів, що ускладнює завдання оцінки та забезпечення структурної живучості мереж з невизначеною топологією.

У даній роботі запропонований метод оцінки та забезпечення структурної живучості мереж з невизначеною топологією на основі показника структурної живучості $P_{ПСЖ}$, що визначається з використанням нижньої ($P_{НМСЖ}$) і верхньої ($P_{ВМСЖ}$) меж структурної живучості.

Вибір показника $P_{ПСЖ}$ на основі $P_{НМСЖ}$ і $P_{ВМСЖ}$ визначається тим, що даний показник задовольняє основним вимогам [1], а саме:

а) за смисловим змістом $P_{ПСЖ}$ визначається на основі потокового підходу, який використовується для вирішення завдань синтезу живучих систем, оцінки, забезпечення і підвищення живучості систем;

б) необхідний рівень системності досліджень забезпечується врахуванням множини шляхів, організованих для обслуговування заявок на надання сервісів, що надходять в мережу, і множини розрізів, які поділяють ці шляхи;

в) показник $P_{ПСЖ}$ має високу ступінь формалізації, що дозволяє виконати його розрахунок і провести дослідження його змін при зміні ситуації в ТКМ;

г) розрахунок $P_{ПСЖ}$ здійснюється на основі врахування вимог на надання сервісів, що надійшли в ТКМ, і можливостей по їх обслуговуванню, що дозволяє забезпечити чутливість показника до будь-яких змін на рівні характеристик ТКМ.

Зв'язок між парою вузлів, що тяжіють, забезпечується шляхами, отже для оцінки структурної живучості зв'язку необхідно визначити кількість незалежних для даного зв'язку шляхів. Будемо розглядати усі існуючі шляхи між парою вузлів як квазінезалежні – таке допущення природно при використанні комутації пакетів. Застосування всіх шляхів, що реалізують зв'язок (s-*t*) рангу не більше *R* і розглядання їх

як незалежних для даного зв'язку, дасть верхню межу структурної живучості зв'язку між вузлами (s-*t*). Застосування всіх шляхів рангу не більше *R* для всіх пар вузлів мережі, що тяжіють, дасть у підсумку загальну верхню межу структурної живучості – $P_{ВМСЖ}$ – мережі.

Застосування всіх розрізів, що розділяють використовувані шляхи для кожної пари вузлів (s-*t*), дасть нижню межу структурної живучості зв'язку між вузлами (s-*t*). Застосування всіх розрізів для всіх пар вузлів мережі, що тяжіють, дасть у підсумку загальну нижню межу структурної живучості – $P_{НМСЖ}$ – мережі. Отримані загальні оцінки $P_{ВМСЖ}$ і $P_{НМСЖ}$ надають можливість отримати оцінку структурної живучості мережі невизначеної топології.

Запропонований метод оцінки структурної живучості мережі невизначеної топології заснований на визначенні числа шляхів (і поділяючих їх розрізів), які можуть бути використані для обслуговування заявок, що надходять у мережу, що уможливлює отримати загальні оцінки $P_{ВМСЖ}$ і $P_{НМСЖ}$ і на їхній основі одержати результуючу оцінку структурної живучості усієї мережі – $P_{ПСЖ}$.

Ідея методу заснована на результатах роботи [5], у якій виконана оцінка числа шляхів у мережі з деяким числом пунктів *n* і деяким числом гілок *L*, а саме: число шляхів рангу *r* визначається за виразом (1):

$$M_{r,L} = \frac{n(n-1)}{2} \mathrm{C}_{n-2}^{r-1} \left(1 - \frac{2m_{r,L_{\max}}}{n(n-1)\mathrm{A}_{n-2}^{r-1}}\right)^{l}, \quad (1)$$

де $L_{\max} = n(n-1)$ – кількість гілок у повнозв'язній мережі; $l = L_{\max} - L$.

З виразу (1) можна отримати кількість шляхів рангу *r*, що припадають на один зв'язок (*s*–*t*), в мережі з *n* вузлами та *L* гілками:

$$m_{(st)r,L} = \frac{M_{r,L}}{g} = \frac{M_{r,L}}{n(n-1)}, \quad (2)$$

де *g* – загальне число пар вузлів, що тяжіють.

Слід зазначити, що в мережах невизначеної топології оцінка (2), безумовно, є орієнтовною, оскільки такі мережі не являються регулярними структурами. Проте, на основі виразу (2) визначається загальна кількість шляхів, які можуть використовуватися для одного зв'язку (s-*t*), а саме – кількість припустимих шляхів відповідних рангів *r*, загальна кількість яких не повинна перевищувати заданого значення *M*, обумовленого відповідно до прийнятих правил маршрутизації.

Визначення кількості шляхів відповідних рангів *r*, які можуть використовуватися для одного зв'язку (s-*t*), може бути здійснено в такий спосіб.

У повнозв'язній мережі відома загальна кількість шляхів усіх рангів – від 1 до *R* для одного зв'язку (s-*t*) – $m_{1..Rst}$, а також число шляхів деякого рангу *r* між вузлами m_{rst} [5].

Знаючи загальну кількість шляхів $m_{1..Rst}$ і число шляхів деякого рангу *r* між вузлами (s-*t*) m_{rst}, можна визначити частку шляхів кожного рангу *r* в загальній кількості шляхів всіх рангів для зв'язку (s-*t*) – X_{rst} (3):

$$X_{rst} = \frac{m_{rst}}{m_{1...Rst}} = \frac{A_{n-2}^{r-1}}{\sum_{r=1}^{R} A_{n-2}^{r-1}}, \quad (3)$$

$$X_{ij} = \frac{m_{rst}}{m_{1..Rst}} = \frac{A_{n-2}^{r-1}}{\sum_{r=1}^{R} A_{n-2}^{r-1}},$$

($s, t = \overline{1,n}$, *n* – число вузлів мережі)

У випадку, якщо мережа є повнозв'язною і її структура відома та не змінюється, можна вважати, що частка шляхів кожного рангу для окремої пари вузлів (s-*t*) буде такою ж й для інших пар, тобто часткове співвідношення кількості шляхів певних рангів зберігається для всіх пар. Якщо мережа стає неповнозв'язною, однак зі зміною кількості гілок пропорційно змінюються й ступені вузлів мережі, то часткове співвідношення (3) у такій мережі дає можливість визначення числа шляхів відповідних рангів для зв'язків (s-*t*) ($s, t = \overline{1,n}$, *n* – кількість вузлів мережі).

У випадку зміни структури мережі – збільшенні або зменшенні числа вузлів, видаленні окремих гілок, коли ступені вузлів мережі змінюються непропорційно, змінюється й часткове співвідношення числа шляхів різного рангу для різних зв'язків (s-*t*). У таких ситуаціях оцінка числа шляхів кожного рангу при різних значеннях *n* і *L* може бути отримана на основі моделювання структури мережі.

Таким чином, частка шляхів кожного рангу може бути обчислена на основі виразу (3), якщо часткове співвідношення шляхів кожного рангу зберігається, або може бути визначена на основі імітаційного моделювання.

Отже, на основі виразів (2) і (3) для зв'язку (s-*t*) визначається загальне число шляхів, ранг яких не перевищує заданого припустимого значення R_{max} (звичайно $R_{max} \leq 4$) формується множина припустимих шляхів – M_{st}, (число шляхів у якому (ЧШ) визначається заданим значенням *M*: ЧШ≤ *M)*. Зазначена множина

M_{st} використовується для розрахунку для зв'язку (s-*t*) верхньої межі структурної живучості $P_{ВМСЖst}$ мережі з невизначеною топологією як імовірність неураження хоча б одного шляху μ_{st}^{k} множини шляхів M_{st} обслуговування заявки (4):

$$P_{ВМСЖ\ st} = 1 - \prod_{\mu_{st}^{k} \in M_{st}} (1 - \prod_{a_i \in \mu_{st}^{k}} p_i), \tag{4}$$

де a_i – ділянка шляху μ_{st}^{k}; ($k = \overline{1, M(ЧШ)}$, M(ЧШ) – число шляхів множини M_{st}).

p_i – імовірність неураження ділянки a_i при НВ.

Відзначимо, що в отриманій множині шляхів M_{st} фіксується не послідовність ділянок a_i шляхів, а кількість ділянок кожного *k*-го шляху $\mu_{st}^{k} \in M_{st}$ з відповідними значеннями p_i – імовірностями неураження ділянок, які можуть визначатися, наприклад, на основі експертних оцінок, статистичних даних чи із застосуванням одного з чисельних методів (наприклад, методом Монте-Карло, методом Неймана тощо).

Запропоновано шляхи множини M_{st} представляти в диз'юнктивній нормальній формі (ДНФ), де кожному терму відповідає шлях, а ранг терму визначається рангом шляху. Таким чином, у випадку, коли множина шляхів M_{st} зв'язку (s-*t*) включає, наприклад, один шлях рангу 1, два шляхи рангу 2 і два шляхи рангу 3, ДНФ має такий вигляд (5):

$$M_{st} = a_1 \vee a_2a_3 \vee a_4a_5 \vee a_6a_7a_8 \vee a_9a_{10}a_{11}. \tag{5}$$

Тут a_i позначає ділянку шляху.

Як видно, шлях першого рангу складається з однієї ділянки a_1 і йому відповідає терм, ранг котрого дорівнює «1». Є два шляхи другого рангу – a_2a_3 і a_4a_5, кожний з яких включає дві ділянки – a_2 і a_3, а також a_4 і a_5, відповідно, і їм відповідають терми, ранг яких дорівнює «2» і т.д.

Відзначимо, що всі шляхи множини M_{st} (5) позначені як незалежні, а саме – кожна ділянка a_i (гілка) належить єдиному шляху. Саме ця обставина й уможливлює одержання верхньої межі структурної живучості мережі. У реальних мережах шляхи можуть бути пересічними, тобто деяка ділянка a_i може належати більш ніж одному шляху, однак при розрахунку $P_{ВМСЖ}$ приймається умова, що всі шляхи кожної множини M_{st} ($s, t = \overline{1, n}$, n – число вузлів мережі) є незалежними.

На основі отриманої множини шляхів M_{st} формується множина поділяючих їх розрізів σ_{st}. Запропоновано розрізи множини σ_{st} представляти в ДНФ, де кожному терму відповідає розріз, а ранг терму визначається рангом розрізу.

Для формування множини σ_{st} у ДНФ необхідно одержати двоїсту булеву функцію множини M_{st} – замінити в M_{st} всі операції диз'юнкції на операції кон'юнкції, а операції кон'юнкції на операції диз'юнкції. У результаті формується кон'юнктивна нормальна форма (КНФ). Після перетворення КНФ (розкриття дужок на основі законів алгебри логіки) одержуємо множину σ_{st} у ДНФ.

Отримана множина σ_{st} використовується для розрахунку для зв'язку (s-*t*) нижньої межі структурної живучості $P_{НМСЖst}$, що визначається як імовірність неураження множини розрізів δ_{st}, що розділяють множину шляхів M_{st} обслуговування заявки (6):

$$P_{НМСЖst} = \prod_{\delta_{st}^{y} \in \delta_{st}} (1 - \prod_{a_i \in \delta_{st}^{y}} (1 - p_i)), \tag{6}$$

де a_i – ділянка розрізу δ_{st}^{y} ($y = \overline{1, Y}$, Y – число розрізів, що розділяють множину шляхів M_{st}).

Відзначимо, що як і у випадку множини шляхів M_{st}, для кожного *y*-го розрізу $\delta_{st}^{y} \in \sigma_{st}$ фіксується кількість ділянок a_i, що становлять розріз, з відповідними значеннями p_i – імовірностями неураження ділянок розрізу.

На основі отриманих значень $P_{ВМСЖst}$ і $P_{НМСЖst}$ визначається показник структурної живучості зв'язку (s-*t*) – $P_{ПСЖst}$ як середньозважена величина (7):

$$P_{ПСЖst} = P_{ВМСЖst}\ w_{ВМСЖ} + P_{НМСЖst}\ w_{НМСЖ}, \tag{7}$$

де $w_{ВМСЖ}$ й $w_{НМСЖ}$ – вагові коефіцієнти, що визначають важливість, значимість для визначення $P_{ПСЖst}$ показників $P_{ВМСЖst}$ і $P_{НМСЖst}$, відповідно. Ці коефіцієнти доцільно визначати на основі експертних оцінок за умови (8):

$$w_{ВМСЖ} + w_{НМСЖ} = 1. \tag{8}$$

Якщо умова (8) не дотримується, то розрахунок показника структурної живучості $P_{ПСЖst}$ зв'язку (s-*t*) здійснюється за виразом (9):

$$P_{ПСЖst} = \frac{P_{ВМСЖst}\ w_{ВМСЖ} + P_{НМСЖst}\ w_{НМСЖ}}{w_{ВМСЖ} + w_{НМСЖ}}. \quad (9)$$

Тут $w_{ВМСЖ}$ і $w_{НМСЖ}$ – вагові коефіцієнти, які задаються в бальній системі оцінок (наприклад, 10-і або 100-бальній).

Відзначимо, що для всіх зв'язків (s-*t*) ($s, t = \overline{1, n}$, *n* – число вузлів мережі) значення $w_{ВМСЖ}$ й $w_{НМСЖ}$ однакові, оскільки ці значення визначають значимість верхньої та нижньої меж структурної живучості, а не значущість зв'язків (s-*t*).

Процедура визначення верхньої $P_{ВМСЖst}$ (4) та нижньої $P_{НМСЖst}$ (6) меж структурної живучості й на їхній основі – визначення показника структурної живучості $P_{ПСЖst}$ ((7) або (9)) здійснюється для всіх зв'язків (s-*t*).

Отримані значення $P_{ПСЖst}$ надають можливість визначення показника структурної живучості мережі з невизначеною топологією $P_{ПСЖ}$ як середньозважене значення показників $P_{ПСЖst}$ ($s, t = \overline{1, n}$, *n* – число вузлів мережі) відповідно до виразу (10):

$$P_{ПСЖ} = \frac{\sum_{s=1}^{n}\sum_{t=1}^{n} P_{ПСЖst}\, w_{st}}{\sum_{s=1}^{n}\sum_{t=1}^{n} w_{st}}. \quad (10)$$

Тут w_{st} – вагові коефіцієнти, що визначають важливість, значимість для визначення $P_{ПСЖ}$ показників $P_{ПСЖst}$, тобто важливість, значимість зв'язків (*s*-*t*). Визначення цих коефіцієнтів може бути здійснено на основі експертного аналізу чи статистичних даних.

Отримане значення $P_{ПСЖ}$ повинне задовольняти необхідному значенню показника структурної живучості мережі – $P_{ПСЖ}$(нз). У випадку, якщо отримане значення $P_{ПСЖ}$ не задовольняє необхідному $P_{ПСЖ}$(нз), виконується процедура забезпечення необхідного значення $P_{ПСЖ}$(нз) на основі введення структурної надмірності, оскільки властивістю живучості володіють тільки надлишкові системи.

Забезпечення структурної живучості мережі невизначеної топології здійснюється в такий спосіб.

Отримане на основі виразу (10) значення показника структурної живучості мережі $P_{ПСЖ}$ порівнюється з необхідним значенням $P_{ПСЖ}$(нз):

$$P_{ПСЖ} \geq P_{ПСЖ}(\text{нз}). \quad (11)$$

Якщо умова (11) виконується, це означає, що необхідне значення показника структурної живучості $P_{ПСЖ}$(нз) досягнуто. При невиконанні умови (11) – перехід до процедури забезпечення необхідного значення структурної живучості $P_{ПСЖ}$(нз).

У даній роботі завдання забезпечення структурної живучості мережі невизначеної топології формулюється як задача лінійного програмування, у результаті рішення якої формується оптимальна структура резерву ділянок шляхів (розрізів), а саме:

Мінімізувати значення цільової функції (12) при виконанні обмеження (11):

$$C_{\text{СИС}} = \sum_{i=1}^{l} c_i m_i \rightarrow \min, \quad (12)$$

де $C_{СИС}$ – вартість системи резервних елементів;

i – номер ділянки в системі;

l – кількість ділянок у системі (число гілок мережі);

c_i – вартість *i*-ї резервної ділянки системи;

m_i – кратність резервування *i*-ї ділянки системи.

Відзначимо, що в оптимізаційному процесі резервування беруть участь усі гілки a_i (ділянки шляхів або розрізів). У випадку, коли відсутня необхідність у резервуванні *i-ї* ділянки, значення кратності резервування такої ділянки $m_i = 0$.

Рішення наведеної оптимізаційної задачі зводиться до наступного: знайти вектор оптимальної структури резерву $M(m_1, m_2, ...m_l)$, що забезпечує мінімум функції (12) при обмеженні (11).

Для вирішення задачі оптимального резервування найбільш ефективне застосування градієнтного методу. Зручність цього методу полягає в тому, що для рішення не потрібно знати аналітичного вираження досліджуваної функції, а потрібно лише мати значення функції і її перших часткових похідних у точках, у які ми попадаємо в процесі руху до екстремуму функції.

Ефективність резервування кожної *i*-ї ділянки оцінюється на основі виразу (13) при збільшенні кратності її резервування на одиницю [6]:

$$\gamma(m_i+1)=\frac{p_i(m_i+1)-p_i m_i}{c_i\cdot p_i(m_i)}, \tag{13}$$

де $p_i(m_i+1),\ p_i(m_i)$ – значення показника імовірності неураження i-ї ділянки при кратності резервування (m_i+1) та m_i, відповідно.

Створення оптимальної резервної системи представимо у вигляді наступного багатокрокового процесу. Розглядається система, що складається з l ділянок, при тому, що на початковому етапі процесу допускається, що жодна з ділянок не має резервних елементів. На першому кроці процесу відшукується така ділянка, додавання до якої одного резервного елемента дає найбільший «питомий» виграш у приросту показника структурної живучості $P_{ПСЖ}$ системи, тобто найбільший приріст на одиницю вартості. На другому кроці визначається наступна ділянка (включаючи і ту, до якої тільки що був приєднаний резервний елемент), додавання до якої одного резервного елемента дає знову найбільше відносне збільшення показника структурної живучості системи. Аналогічним способом процес побудови оптимальної системи триває далі.

Враховуючи вплив процесу резервування на зміну значень $P_{ВМСЖst}$ і $P_{НМСЖst}$, а також $P_{ПСЖst}$ для кожного зв'язку (s–t), ($s,t=\overline{1,n}$, n – кількість вузлів мережі), отже и на зміну значення $P_{ПСЖ}$, запропонована наступна послідовність розрахунків.

Відповідно до виразу (13) при збільшенні на одиницю кратності резервування кожної i-ї ділянки визначаються $\gamma_{ВМСЖ}(m_i+1)$ – для множин шляхів M_{st} усіх звязків (s–t), а також $\gamma_{НМСЖ}(m_i+1)$ – для множин відповідних розрізів σ_{st} ($s,t=\overline{1,n}$, n – кількість вузлів мережі). В результаті для кожної i-ї ділянки формується середньозважене значення $\gamma_{срзв}$ (14), максимальне значення якого серед усіх отриманих середньозважених величин для всіх ділянок визначає номер ділянки для збільшення на одиницю її резерву на цьому етапі:

$$\gamma_{срзв}=\frac{w_{ВМСЖ}\gamma_{ВМСЖ}+w_{НМСЖ}\gamma_{НМСЖ}}{2}, \tag{14}$$

де $\gamma_{ВМСЖ}$ і $\gamma_{НМСЖ}$ – значення показників, отриманих за формулою (13) при розрахунках нижньої і верхньої меж структурної живучості.

Після цих дій за виразом (10) виконується розрахунок $P_{ПСЖ}$ і визначається виконання умови (11). Якщо умова (11) виконується, процес завершується, у протилежному випадку виконується наступний етап резервування. На кожному наступному етапі процесу резервування виконуються такі ж самі дії: знаходиться ділянка (включаючи і ту, до якої на попередньому етапі був приєднаний резервний елемент), додавання до якої одного резервного елемента дає знову найбільше відносне збільшення показника структурної живучості системи $P_{ПСЖ}$ в цілому.

Система оптимального резервування будується доти, поки не буде досягнуто виконання умови (11).

Подальшим розвитком роботи є вирішення питань визначення імовірності неураження p_i ділянок a_i мережі, значень $w_{ВМСЖ}$ и $w_{НМСЖ}$ (вагових коефіцієнтів, що визначають вагомість, значущість верхньої $P_{ВМСЖst}$ та нижньої $P_{НМСЖst}$ меж структурної живучості), а також значень w_{st} – вагових коефіцієнтів, що визначають важливість, значимість для визначення $P_{ПСЖ}$ показників $P_{ПСЖst}$, що надасть можливість більш точного оцінювання структурної живучості мереж невизначеної топології. Також планується формування підходів до встановлення найбільш шкідливих втручань, які із найбільшою імовірністю можуть задіяти шкоду структурній живучості мережі у вигляді неконтрольованого наповнення різноманітною інформацією [7], або несанкціонованого доступу до об'єкта з подальшою зміною його внутрішніх параметрів.

Висновок. У даній роботі обґрунтовано необхідність оцінки та забезпечення структурної живучості ТКМ в умовах ускладнення як структури мережі, так і зростання кількості та різноманітності проявів несанкціонованого доступу та кіберзагроз, а також неконтрольованого невідфільтрованого потоку даних, таким чином все більшої актуальності набуває необхідність розробки теоретичних основ оцінки та формування підходів щодо удосконаленого забезпечення живучості ТКМ.

Запропоновано спосіб оцінки та забезпечення структурної живучості мереж з невизначеною топологією на основі показника $P_{ПСЖ}$, який визначається з використанням нижньої і верхньої меж структурної живучості.

Надано вирази для визначення числа шляхів різних рангів, які можуть бути використані для обслуговування заявок, що надходять в мережу невизначеної топології, а також спосіб отримання множини розрізів, які поділяють шляхи. Представлені вирази, що дозволяють визначити верхню і нижню межі структурної живучості для кожного зв'язку і мережі в цілому. Представлено формулювання задачі забезпечення необхідного рівня структурної живучості як задачі лінійного програмування, в результаті вирішення якої формується оптимальна структура резерву ділянок шляхів (розрізів), з урахуванням якої і формується оцінка структурної живучості мережі з невизначеною топологією.

Література

1. Стекольников Ю.И. Живучесть систем / Стекольников Ю.И. – СПб : Политехника, 2002. – 155 с.

2. Синтез и анализ живучести сетевых систем : монография / Ю.Ю. Громов, В.О. Драчев, К.А. Набатов, О.Г. Иванова. – М. : «Изд-во Машиностроение-1», 2007. – 152 с.

3. Додонов А.Г. Живучесть информационных систем / А.Г. Додонов, Д.В. Ландэ. – К. : Наук. думка, 2011. – 256 с.

4. Князева Н.А. Метод обеспечения структурной живучести телекоммуникационной сети / Н.А. Князева // International Journal Information technologies and knowledge. – 2014. – V. 8, № 2. – С. 152–165.

5. Князева Н.А. Метод оценки структурной надежности сети при изменении ее структуры / Н.А. Князева, А.Л. Ненов // Вісник ДУІКТ. – К., 2011. – Т. 9, № 4. − С. 318–325.

6. Князева Н.О. Повышение структурной живучести телекоммуникационной сети / Н.А. Князева // International Journal Information models and analyses. – 2013. – V. 2, № 3. – P. 275–284.

7. Князєв О.А. Метод адаптивной оценки URI в комплексных системах фильтрации контента / В.А. Каптур, О.А. Князєв // Наукові праці ОНАЗ. – Одеса, 2016. – № 1. – С. 35–45.

References

1. Stekolnikov U. The system survivability. - St. Petersburg: Polytechnics, 2002. – 155 p.

2. Synthesis and analysis of survivability of network systems: a monograph / U. Gromov, V. Drachev, K. Nabatov, O. Ivanova. – Moscow: Publishing House "Mashinostroenie", 2007. - 152 p.

3. Dodonov. A. Information Systems Vitality // A. Dodonov, D. Lande. – Kiev: Naukova dumka, 2011. – 256 p.

4. Kniazieva N. The method of the ensurance of structural survivability of telecommunication network / N. Kniazieva // International Journal Information technologies and knowledge, V8, №2, 2014. – P. 152-165.

5. Kniazieva N. Method of assessing the structural reliability of the network when its structure changes // N. Kniazieva, A. Nenov. – Kiev: Visnyk Derzhavnoho universytetu informatsiyno-komunikatsiynykh tekhnolohiy. – SUIKT. - T. 9, № 4, 2011. − P. 318-325.

6. Kniazieva N. Improving the structural vitality of the telecommunications network / N. Kniazieva // International Journal "Information Models and Analyses" Vol.2 / 2013, Number 3. – P. 275-284.

7. Kniaziev A. Adaptive URI Evaluation Method in Complex Content Filtering Systems / A. Kniaziev, V. Captur // Proceedings of the O. S. Popov ONAT, 2016. - № 1. - P. 35-45.

Рецензія/Peer review : 22.1.2019 р. Надрукована/Printed :18.2.2019 р.
Стаття рецензована редакційною колегією

ОБМІН ПРАКТИЧНИМ ДОСВІДОМ, ТЕХНОЛОГІЯМИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

DOI 10.31891/2307-5732-2019-269-1-239-243
УДК 004.58

В.М. КИЧАК, С.М. ЗЛЕПКО, В.І. МАКОГОН
Вінницький національний технічний університет

ТЕХНОЛОГІЯ ПСИХОФІЗІОЛОГІЧНОГО ВІДБОРУ ОПЕРАТОРІВ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

Метою статті є побудова схеми та алгоритму відбору за психофізіологічними показниками осіб, придатних до навчання на оператора безпілотних літальних апаратів. У роботі розглянуто особливості роботи екіпажів безпілотних літальних апаратів (БПЛА) різних класів та обґрунтовано необхідність їх психофізіологічного відбору. Запропоновано схему та алгоритм психофізіологічного відбору операторів з оцінкою рівня розвитку дрібної моторики кисті рук, технічного та просторового мислення, а також результатів психологічного тестування. Проведення професійного відбору за такою схемою дозволить значно підвищити ефективність використання безпілотних літальних апаратів.

Ключові слова: безпілотні літальні апарати, оператор, психофізіологічний відбір, дрібна моторика, алгоритм відбору.

V.M. KYCHAK, S.M. ZLEPKO, V.I. MAKOGON
Vinnytsia National Technical University

TECHNOLOGY OF PSYCHOPHYSIOLOGICAL SELECTION OF OPERATORS OF UNMANNED AERIAL VEHICLES

The purpose of the article is to construct a scheme and algorithm of selection according to the psychophysiological indicators of persons suitable for training on the UAV operator. In this paper the features of crews of unmanned aerial vehicles (UAVs) of different classes are considered and the necessity of their psycho-physiological selection is justified. The professional selection of such a scheme will significantly increase the efficiency of UAV use. Unmanned aerial vehicles are widely used in various sectors of the Ukrainian economy. They are most widely used for photo and video shooting, and unmanned aerial vehicles are actively used by the armed forces and the police. Today, most developed countries have their units equipped with unmanned aerial vehicles. Such apparatuses are usually large in size and mass, in addition they can carry arms. For the effective and safe use of such devices, the level of training of the personnel working with this device is a determining factor. Due to the use of modern automation systems, the operator's operation is significantly simplified, but the take-off and landing is usually carried out manually. In this work features of crews of unmanned aerial vehicles of different classes are considered and the necessity of carrying out of psychophysiological selection of their operators is grounded. The review of sets of psychological tests and the system of psychological diagnostics selected is the closest to the set of necessary tests. The defining role of small motility for the successful operation of an unmanned aerial vehicle operator is substantiated. An overview of methods and tools for determining its level of development was made and it was determined that at present there are no methods and tools that take into account the specifics of the operation of the operator with the equipment of control of an unmanned aerial vehicle. The scheme and algorithm of psychophysiological selection with the estimation of the level of development of fine motor hands of hands with the help of a remote control by an unmanned aerial vehicle is offered. Also, the scheme of selection involves the testing of technical and spatial thinking and psychological testing. Carrying out professional selection under such a scheme will significantly increase the efficiency of the use of unmanned aerial vehicles.

Key words: unmanned aerial vehicles, operator, psychophysiologial selection, mileage motility, selection algorithm.

Вступ

Безпілотні літальні апарати (БПЛА) протягом останніх років широко використоёвуються у багатьох сферах діяльності людини. Основною сферою використання БПЛА залишається фото та відеозйомка. Такі безпілотні системи майже витіснили у цій сфері пілотовані апарати. Результати фото або відеозйомки з БПЛА можуть використовуватися для прогнозування надзвичайних ситуацій, контролю державних кордонів, моніторингу дорожньої ситуації, запобігання несанкціонованим вирубкам лісу та браконьєрству в національних парках і заповідниках, моніторингу стану технологічних об’єктів, автомобільних і залізничних шляхів, аеропортів, трубопроводів [1].

В Україні БПЛА широко застосовують військові, аграрії, професійні відеооператори та авіамоделісти. Найбільш підготовленими операторами є авіамоделісти, адже зазвичай вони мають значний досвід подібної діяльності і відпрацьовують свої навики на різноманітних моделях БПЛА. На жаль інші користувачі БПЛА не проходять подібної підготовки, що може привести до нещасних випадків та втрат літальних апаратів. Особливу увагу до навчання операторів БПЛА приділяють військові, адже вартість БАК, які вони використовують надзвичайно висока, крім того вони часто є носіями озброєння, що накладає особливі вимоги до операторів які ними керують.

Відчути переваги БПЛА в умовах бойової обстановки змогли ті країни, військові контингенти яких брали участь у локальних війнах та збройних конфліктах. В результаті протягом двох десятиріч кількість країн, які використовують БПЛА, збільшилася у 20 разів, а кількість безпілотних апаратів – у 40 разів [2, 3].

Сучасні БПЛА за рівнем технічної оснащеності в деяких випадках перевищують пілотовані літальні апарати. Виходячи з цього, саме керування БПЛА стає найбільш вразливою ланкою під час виконання бойового завдання та забезпечення льотної безпеки. Відсутність єдиних стандартів льотно-технічної і оперативно-тактичної підготовки операторів стає головною причиною аварій і безповоротних втрат

апаратів.

Проблему підготовки операторів БПЛА можна розділити на дві частини. Перша – це оптимізація процесу професійного відбору кадрів. Друга – це питання цілісної системи спеціальної підготовки професійних кадрів.

В Україні підготовкою операторів БПЛА займаються в основному підприємства які здійснюють продаж та обслуговування БПЛА, та надають послуги з їх використання. Навчання, зазвичай, здійснюється за такою схемою: навчання на авіасимуляторі; навчальні польоти на тренувальних моделях БПЛА; навчальні польоти на реальній моделі БПЛА.

Навчання за такою схемою дозволяє виявляти кандидатів, які через свої психо-фізіологічні здібності не відповідають цьому напрямку діяльності, лише на завершальних етапах навчання, коли вже витрачені значні фінансові кошти та часові ресурси.

Основна частина

У роботі [5] вказується, що для роботи з мініатюрними БПЛА, які запускаються з руки, оператори потребують лише спеціальної підготовки без професійного добору. Вартість таких БПЛА залежно від корисного навантаження коливається у межах 10–200 тис. у.о. і маса може досягати 5 кг. Враховуючи високу вартість таких апаратів та цінність даних, які отримують за їх допомогою під час бою, для операторів таких БПЛА необхідний професійний відбір. Ще одним фактором, який підтверджує необхідність такого відбору, є висока вартість навчання операторів.

Досвід експлуатації безпілотних авіаційних комплексів(БАК) показує, що для керування та прийняття рішень у наземному пункті керування необхідна команда з трьох осіб [6]: оператор керування польотом БПЛА; оператор бойових систем; оператор інтелектуальних систем.

У комплексах тактичного радіусу дії 10–20 км використовуються апарати масою 5–10 кг, обладнані розвідувальною фото-, відеоапаратурою, з командою з 2 осіб: оператор керування БПЛА; оператор корисного навантаження.

Окремо можна виділити командирів БПАК, які здійснюють керівництво розрахунком, планування польотних завдань, та взаємодію з командуванням, організацію підготовки БПЛА до польоту, керівництво діями підлеглих при виникненні аварійних ситуацій на борту тощо [5]. Як приклад можна привести комплекс дистанційного спостереження «Елерон 10-СВ» [7].

Як бачимо у БАК різних типів у складі команди, яка з ним працює обов’язково є оператор керування БПЛА. Оскільки помилки, що пов’язані з діяльністю оператора, можуть призвести до втрати БПЛА доцільно проводити відбір для цієї професії [5].

В Україні створені та впроваджені автоматизовані психодіагностичні комплекси для різних сфер діяльності різних виробників. Найбільш близькою за набором необхідних тестів та методів для відбору операторів БПЛА є система психологічної діагностики «Лідер-1». Вона містить наступні методики:

- БОО “Адаптивність -200”;
- методика експрес діагностики властивостей нервової системи (тепінг-тест);
- методика виявлення комунікативних та організаторських схильностей (КОС-2);
- методика “Лідерські якості”;
- методика діагностики самооцінки психічних станів (адаптований варіант методики Г. Айзенка);
- методика діагностики мотивації Т. Елерса;
- методика діагностики типу поведінкової активності Вассермана і Гуменюка;
- диференційно-діагностичний опитувальник (ДДО) Є.О. Климова.

Для роботи оператора БПЛА, крім психологічних, важливим показником є також рівень розвитку дрібної моторики, адже більшість пультів керування БПЛА використовують важелі, які керуються великими пальцями рук або аналоги штурвалів з великою кількістю перемикачів. Система «Лідер-1» має у своєму складі лише теппінг-тест, який дозволяє оцінити стан нервової системи, але не дозволяє оцінити рівень дрібної моторики. Травми, нервові хвороби та інші фактори можуть призводити до порушень дрібної моторики. Своєчасне виявлення осіб з такими порушеннями дозволить відбирати більш здібних кандидатів для роботи з важкими апаратами, коли зростає рівень відповідальності оператора БПЛА.

Тому розробка автоматизованого комплексу для діагностики дрібної моторики є актуальним завданням, розв'язання якого дозволить значно підвищити якість відбору кандидатів на навчання операторів БПЛА.

Протягом останніх років створюються комп'ютеризовані комплекси для визначення рівня дрібної моторики. Серед них можна виділити метод автоматизованого тестування дрібної моторики руки на графічному планшеті [8]. Недоліком цього способу є обмежені функціональні можливості які обумовлені тим, що при визначені точності виконання завдань недостатньо уваги звертається на час виконання завдань та фіксацію максимального відхилення отриманих та заданих траєкторій завдань, утримування цифрового бездротового пера передбачає його фіксацію кількома пальцями одночасно, це приводить до того, що оцінюється дрібна моторика лише для кисті в цілому. Так як у пультах дистанційного керування радіо моделями основними органами керування є важелі, переміщення яких здійснюється великими пальцями руки, то вище описаний спосіб не дозволить оцінити особливості дрібної моторики рук, які необхідні для оператора дистанційно-керованих пристроїв.

Для усунення цього недоліку необхідно для тестування рівня дрібної моторики використовувати

пульт дистанційного керування БПЛА.

Для швидкого та результативного навчання на оператора БПЛА необхідно, щоб кандидат мав високий рівень просторового мислення, адже при роботі з БПЛА його контроль здійснюється візуально, зовні апарата, який може рухатись як до оператора, так і від нього. Тому використання тестування образного мислення є необхідним під час відбору операторів БПЛА.

Тестування та відбір за основними психофізіологічними показниками такими як увага, образне мислення, врівноваженість, рівень розвитку дрібної моторики дозволить виявляти відповідність кандидата до вимог оператора БПЛА та гарантувати його швидке й результативне навчання.

Схема для проведення такого відбору виглядає наступним чином:

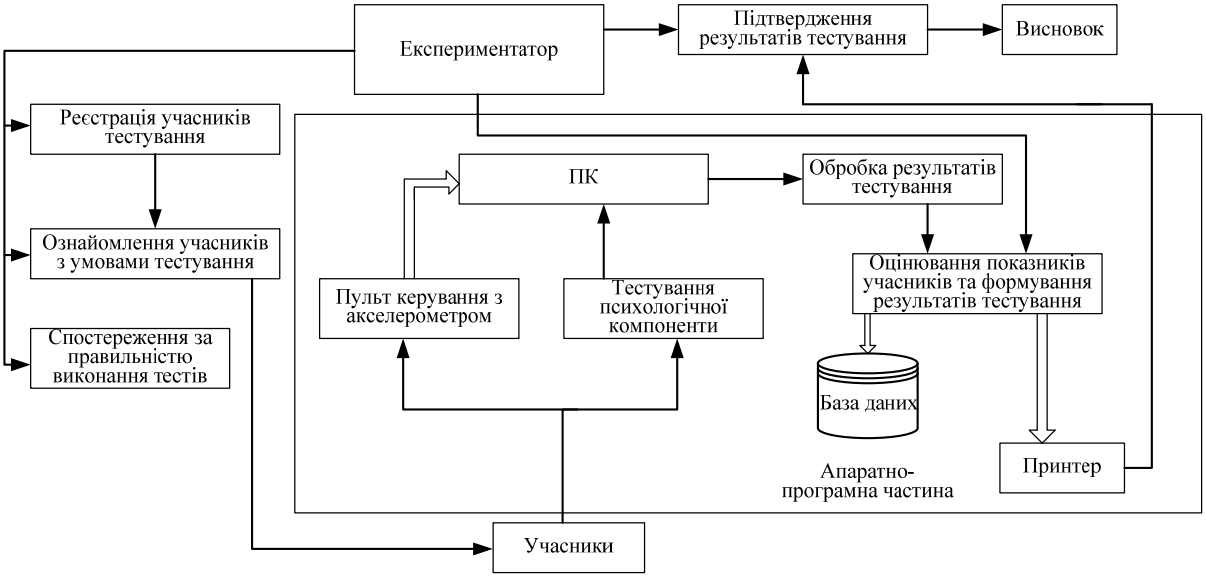


Рис. 1. Структурна схема процесу відбору операторів БПЛА

Основним елементом для проведення такого тестування є персональний комп'ютер(ПК), який здійснює обробку отриманих результатів тестування дрібної моторики, технічної спрямованості, образного мислення. Отримані результати тестування зберігаються у базі даних та виводяться для друку на принтер. Для того, щоб реалізувати всі необхідні функції які покладені на ПК на ньому має бути встановлено спеціалізоване програмне забезпечення до складу якого мають входити наступні модулі:

- модуль визначення рівня розвитку дрібної моторики;
- модуль визначення розвитку технічного мислення (тест Баннета);
- модуль визначення рівня просторового сприйняття;
- модуль отримання результатів психологічного тестування;
- модуль роботи з послідовним інтерфейсом;
- модуль роботи з принтером;
- модуль комплексної оцінки психофізіологічної придатності для роботи оператором БПЛА.

Для тестування дрібної моторики використовується пульт керування БПЛА з вбудованим акселерометром, який дозволяє відстежувати положення та переміщення пульта керування у просторі під час тестування. Для зв'язку з персональним комп'ютером у склад пульта вводиться інтерфейсний блок, який дозволяє передавати данні переміщення органів керування та покази акселерометра через USB – інтерфейс до персонального комп'ютера.

Важливу роль під час тестування відіграє екпериментатор, адже на нього покладаються такі функції як:

- реєстрація учасників тестування;
- ознайомлення учасників з умовами тестування;
- спостереження за дотриманням умов тестування учасниками;
- підтверджувати результати тестування та вносити результати до бази даних.

База даних призначена для зберігання результатів тестування кожного з учасників, для подальшого використання .

Відбір за цією схемою відбувається наступним чином:

1 – відбувається реєстрація учасників та ознайомлення учасників із умовами відбору, особливостями роботи із пультами дистанційного керування БПЛА, часовими рамками виконання тестів.

2 – початок тестування, під час якого експериментатор слідкує за учасниками тестування та попереджує порушення умов виконання тестів.

3 – після проходження тестів результати тестування психологічної компоненти та дрібної моторики обробляють на ЕОМ та формується висновок чи придатний даний кандидат до роботи оператором БАК, та яка посада найбільш повно відповідає показникам кандидата на даний час.

За необхідності учасникам тестування можуть видаватися результати тестування надруковані на принтері та підтверджені експериментатором.

Для тестування психологічної компоненти можливе використання тестів з системи «Лідер-1».

Алгоритм тестування виглядає наступним чином (рис. 2)

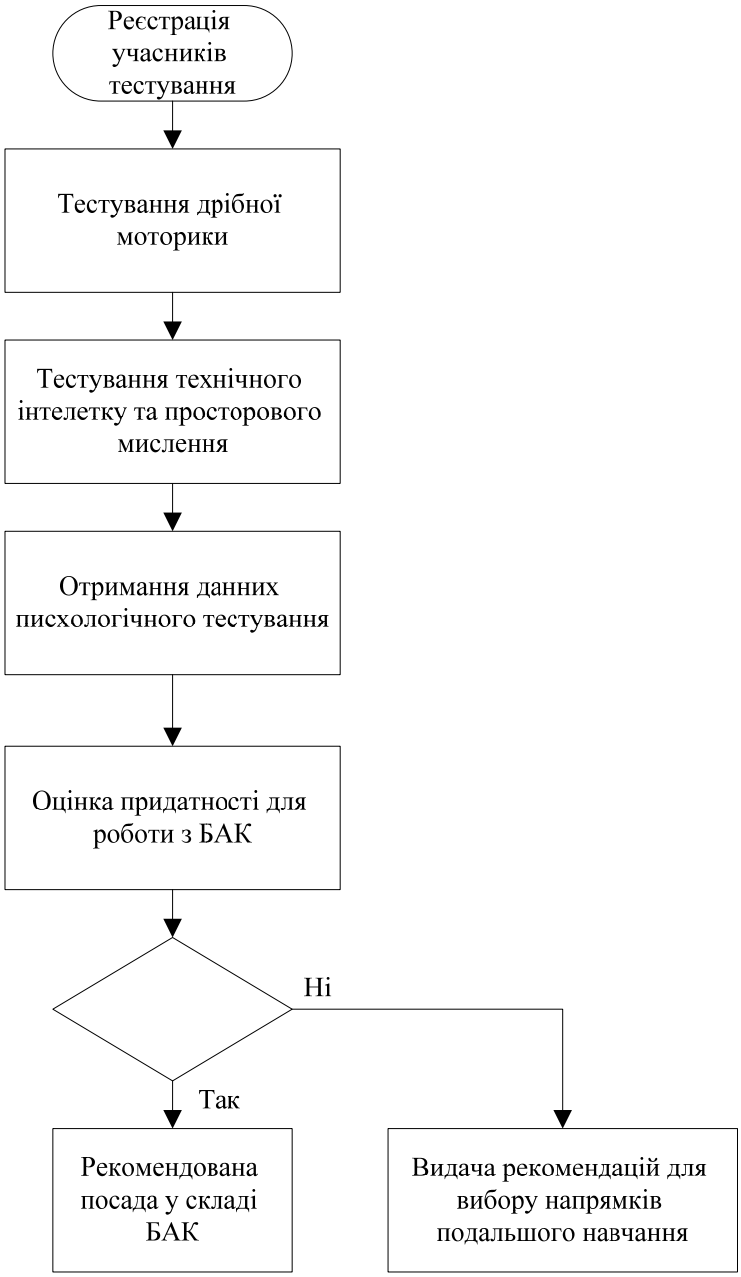


Рис. 2. Алгоритм визначення психофізіологічних показників кандидатів на навчання операторів БАК

Для проходження тестування дрібної моторики необхідна спеціалізована апаратно-програмна частина, до складу якої входять: ПЕОМ, пульт керування БПЛА з вбудованим акселерометром та інтерфейсом, що забезпечує зв'язок з ПЕОМ, спеціалізоване програмне забезпечення, яке дозволить відслідковувати рух флайстіків пульта керування та його положення у просторі. На основі даних з ПК БПЛА програма оцінює рівень дрібної моторики учасника керування, а покази акселерометра дають можливість оцінити наявність тремору кисті, а також дискинезії, які виникають в учасників при проходженні тестування.

Висновки

У даній статті обґрунтовується необхідність проведення психофізіологічного відбору для операторів БПЛА різних типів, наводиться структурна схема процесу та алгоритм такого відбору. Проведення відбору за даним алгоритмом дозволить за рахунок виключення з процесу навчання непридатних осіб, значно підвищити ефективність використання БПЛА а також підвищити рівень безпеки при їх використанні.

Література

1. Глотов В. Аналіз можливостей застосування безпілотних літальних апаратів для аерознімальних процесів / В. Глотов, А. Гуніна // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – 2014. – Випуск II(28). – С. 65–70.

2. Фещенко А.Л. Застосування безпілотних літальних апаратів у воєнних конфліктах кінця XX – початку XXI століття : автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата історичних наук / Фещенко А.Л. – Київ, 2011. – С. 2–5.

3. Фещенко А. Розвиток безпілотних літальних апаратів за досвідом застосування у військових операціях Ізраїлю / А. Фещенко // Воєнна історія . – 2009. – № 6(48). – С. 23–35.

4. Лосев А.Е. О подготовке операторов БЛА в ВВС США [Електронний ресурс] / Лосев А.Е. – Режим доступу : http://scipeople.ru/publication/67939/

5. Ударцева Т.Е. Доцільність проведення професійного добору операторів керування безпілотними літальними апаратами / Т.Е. Ударцева // Системи озброєння і військова техніка. – 2016. – № 1(45). – С. 186–189.

6. Беляев В. Война в воздухе. Новая угроза. Современные зарубежные беспилотные летательные аппараты и перспективы их развития [Электронный ресурс] / В. Беляев // Авиация и космонавтика. – 2005. – № 1. – Режим доступа : http://www.libros.am/book/read/id/248816/slug/

7. Комплекс «Елерон-10СВ» [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://www.enics.ru/catalog/10sw/.

8. Аврунин О. Г. Разработка метода автоматизированого тестирования мелкой моторики ведущей руки на графическом планшете / О.Г. Аврунин, К.Г. Селиванова // Прикладная радиоелектроника. – 2013. – Том 12. – № 3. – С. 459–465.

References

1. Hlotov V. Analiz mozhlyvostei zastosuvannia bezpilotnykh litalnykh aparativ dlia aeroznimalnykh protsesiv / V. Hlotov, A. Hunina // Suchasni dosiahnennia heodezychnoi nauky ta vyrobnytstva. – 2014. – Vypusk II(28). – S. 65–70.

2. Feshchenko A.L. Zastosuvannia bezpilotnykh litalnykh aparativ u voiennykh konfliktakh kintsia KhKh – pochatku KhKhI stolittia : avtoreferat dysertatsii na zdobuttia naukovoho stupenia kandydata istorychnykh nauk / Feshchenko A.L. – Kyiv, 2011. – S. 2–5.

3. Feshchenko A. Rozvytok bezpilotnykh litalnykh aparativ za dosvidom zastosuvannia u viiskovykh operatsiiakh Izrailiu / A. Feshchenko // Voienna istoriia . – 2009. – № 6(48). – S. 23–35.

4. Losev A.E. O podgotovke operatorov BLA v VVS SShA [Elektronnij resurs] / Losev A.E. – Rezhim dostupu : http://scipeople.ru/publication/67939/

5. Udartseva T.E. Dotsilnist provedennia profesiinoho doboru operatoriv keruvannia bezpilotnymy litalnymy aparatamy / T.E. Udartseva // Systemy ozbroiennia i viiskova tekhnika. – 2016. – № 1(45). – S. 186–189.

6. Beljaev V. Vojna v vozduhe. Novaja ugroza. Sovremennye zarubezhnye bespilotnye letatel'nye apparaty i perspektivy ih razvitija [Jelektronnyj resurs] / V. Beljaev // Aviacija i kosmonavtika. – 2005. – № 1. – Rezhim dostupa : http://www.libros.am/book/read/id/248816/slug/

7. Kompleks «Eleron-10SV» [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : http://www.enics.ru/catalog/10sw/.

8. Avrunin O. G. Razrabotka metoda avtomatizirovanogo testirovanija melkoj motoriki vedushhej ruki na graficheskom planshete / O.G. Avrunin, K.G. Selivanova // Prikladnaja radioelektronika. – 2013. – Tom 12. – № 3. – C. 459–465.

Рецензія/Peer review : 19.1.2019 р. Надрукована/Printed :16.2.2019 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Осадчук О.В.

DOI 10.31891/2307-5732-2019-269-1-244-248
УДК 621.384.3

О.К. КУЧЕРЕНКО, А.Е. ТОМАШЕВСЬКА
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ЗАСТОСУВАННЯ ПІРОМЕТРА СПЕКТРАЛЬНОГО СПІВВІДНОШЕННЯ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ЗНОСУ КОНТАКТНОГО ДРОТУ ЗАЛІЗНИЧНОЇ МЕРЕЖІ

Мета статті – обґрунтування переваг застосування пірометра спектрального співвідношення для контролю зносу контактного дроту залізничної мережі. Основні переваги запропонованого методу полягають в тому, що результати моніторингу не залежать від таких характеристик об'єкта вимірювання, як випромінююча здатність дроту, відстань до нього та стан атмосфери. Наведено результати розрахунку вихідного сигналу пірометра для типових параметрів дроту, оптичної системи пірометра та інших факторів, що мають місце при вимірюваннях.

Ключові слова: контактний дріт залізничного транспорту, пірометр спектрального співвідношення.

O. KUCHERENKO, A. TOMASHEVSKA
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

APPLICATION OF A PYROMETER SPECTRAL RELATIONSHIP TO CONTROL THE WEAR OF A CONTACT WIRE OF RAILWAY NETWORK

The safety of the operation of rail transport is connected with the necessity of control over the deterioration of the wires of the contact networks with the friction of the current collector. The purpose of this article is to justify the benefits of using a spectral pyrometer to control the wear of a contact wire of a railway network. The main advantages of the proposed method are the fact that monitoring results do not depend on such measurement characteristics as radiance, distance from the object to the instrument and the state of the atmosphere. The article presents the results of calculating the output signal of the pyrometer for typical output parameters when monitoring the condition of the contact wire. Also, the graph of the dependence of the coefficient of the spectral relation on the temperature of the contact wire is given. We introduce the concept of the coefficient of the spectral correlation of the CSC. CSC during monitoring of the condition of the contact wire of the railway transport depends on the temperature of the overheating of the wire due to the wear of the cross-section. After analysing the theoretical correlations for the value of the coefficient of the spectral ratio, we can conclude that the value of CSC does not depend on such factors as the distance between the wire and the pyrometer, the coefficient of the radiating ability of the contact wire, the transmission coefficient of the optical system of the pyrometer and the atmosphere. The analysis of these calculations proved the advantages of this method.

Keywords: contact wire of railway transport, pyrometer of spectral ratio, CSC.

Вступ

Безпека експлуатації залізничного транспорту пов'язана з необхідністю контролю за зносом проводів контактних мереж при терті об струмоприймач. Внаслідок неперервного тертя дріт піддається зносу, змінюється профіль його поперечного перетину. Моніторинг повинен проводитися безконтактним методом, так як провід знаходиться під високою напругою (близько 30 кВ.) Для вирішення цієї задачі застосовується ряд методів. Так в роботах [1–3] розглядається можливість застосування тіньових методів, основний недолік яких полягає в необхідності розташування джерела освітлення та фотоприймача по різних сторонах об'єкта вимірювання. В роботах [4–7] пропонується використовувати метод структурного освітлення та лазерної проекційної системи для автоматичного дистанційного контролю геометрії та дефектів контактних проводів. При зазначених авторами можливостях цього методу, реалізація його пов'язана з застосуванням складної оптико-механічної частини пристрою, що впливає на точність вимірювання та надійність експлуатації в реальних умовах.

Очевидним є той факт, що при зносі контактного дроту зменшується площа його поперечного перетину, а це у свою чергу викликає перегрівання дротів у місцях зносу [8]. У більшості європейських країн для перегріву зношених частин дроту прийняті наступні норми:

- 1-а категорія (перегрів менше 50°C) – дріт слід тримати під контролем та піддавати технічному обслуговуванню при наступній перевірці;
- 2-а категорія (перегрів 50°÷300°C) – ремонт дроту в найближчий час з урахуванням навантаження;
- 3-а категорія (перегрів більше 300°C) – потрібен невідкладний ремонт з урахуванням навантаження.

Ціллю роботи є задача визначення вихідного сигналу пірометра спектрального співвідношення при контролі місць перегріву дротів контактних мереж залізниць. При цьому необхідно враховувати ряд основних факторів:

- коефіцієнт теплового випромінювання (КТВ) дроту контактної мережі, значення якого залежать від багатьох факторів;
- середню температуру проводу контактної мережі, обумовлену зоною кліматичного поясу;
- допустиму величину перегріву ділянок дроту контактної мережі;
- відстань між дротом контактної мережі та пірометром з урахуванням можливості закріплення пірометра на планці, пов’язаній зі струмоприймачем;
- температурну чутливість пірометра;
- характеристики оптичної системи пірометра та параметри теплового приймача.

Метод розрахунку вихідного сигналу пірометра спектрального співвідношення

Для визначення вихідного сигналу пірометра спектрального співвідношення при контролі місць перегріву контактного дроту треба скористатися законами теплового випромінювання. Густина теплового випромінювання об'єкта дослідження в заданому спектральному діапазоні визначається законом Планка. Він є основним і найбільш загальним законом в теорії теплового випромінювання. Закон Планка характеризує розподіл по спектру енергії випромінювання абсолютно чорного тіла (АЧТ) і, якщо за змінний параметр прийнята довжина хвилі, закон Планка записують в наступному вигляді [9]:

$$r = \frac{c_1}{\lambda^5 \cdot \left(e^{\frac{c_2}{\lambda \cdot T}} - 1 \right)}, \tag{1}$$

де c_1 і c_2 – перша та друга константи в формулі Планка, пов'язані зі швидкістю світла в вакуумі c_0, сталою Больцмана k і сталою Планка h.

Ці константи дорівнюють:

$$c_1 = 2\pi c_0^2 h,$$

$$c_2 = \frac{c_0 h}{k}.$$

Інтегруючи (1) в межах від $\lambda = 0$ до $\lambda = \infty$, отримуємо значення щільності випромінювання АЧТ у всьому спектральному діапазоні:

$$R_{0-\infty} = \int_0^{\infty} \frac{c_1}{\lambda^5 \cdot \left(e^{\frac{c_2}{\lambda \cdot T}} - 1 \right)} d\lambda. \tag{2}$$

Виходячи з (2) отримаємо значення щільності випромінювання АЧТ в певних спектральних діапазонах:

$$R_{\lambda_1-\lambda_2} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} r d\lambda = \int_0^{\lambda_2} r d\lambda - \int_0^{\lambda_1} r d\lambda,$$

$$R_{0-\lambda_2} = \int_0^{\lambda_2} r d\lambda = \int_0^{\lambda_2} \frac{c_1}{\lambda^5 \cdot \left(e^{\frac{c_2}{\lambda \cdot T}} - 1 \right)} d\lambda,$$

$$R_{0-\lambda_1} = \int_0^{\lambda_1} r d\lambda = \int_0^{\lambda_1} \frac{c_1}{\lambda^5 \cdot \left(e^{\frac{c_2}{\lambda \cdot T}} - 1 \right)} d\lambda,$$

$$R_{\lambda_1-\lambda_2} = \int_0^{\lambda_2} \frac{c_1}{\lambda^5 \cdot \left(e^{\frac{c_2}{\lambda \cdot T}} - 1 \right)} d\lambda - \int_0^{\lambda_1} \frac{c_1}{\lambda^5 \cdot \left(e^{\frac{c_2}{\lambda \cdot T}} - 1 \right)} d\lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{c_1}{\lambda^5 \cdot \left(e^{\frac{c_2}{\lambda \cdot T}} - 1 \right)} d\lambda.$$

Для сірого тіла маємо:

$$R_{\lambda_1-\lambda_2} = \varepsilon_T \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{c_1}{\lambda^5 \cdot \left(e^{\frac{c_2}{\lambda \cdot T}} - 1 \right)} d\lambda,$$

$$R_{\lambda_3-\lambda_4} = \varepsilon_T \cdot \int_{\lambda_3}^{\lambda_4} \frac{c_1}{\lambda^5 \cdot \left(e^{\frac{c_2}{\lambda \cdot T}} - 1 \right)} d\lambda,$$

де ε_T – коефіцієнт теплового випромінювання сірого тіла.

Їх співвідношення матиме вигляд:

$$\frac{R_{\lambda_3-\lambda_4}}{R_{\lambda_1-\lambda_2}}=\frac{\varepsilon_T\cdot\int\limits_{\lambda_3}^{\lambda_4}\frac{c_1}{\lambda^5\cdot\left(e^{\frac{c_2}{\lambda\cdot T}}-1\right)}d\lambda}{\varepsilon_T\cdot\int\limits_{\lambda_1}^{\lambda_2}\frac{c_1}{\lambda^5\cdot\left(e^{\frac{c_2}{\lambda\cdot T}}-1\right)}d\lambda}=\frac{\int\limits_{\lambda_3}^{\lambda_4}\frac{c_1}{\lambda^5\cdot\left(e^{\frac{c_2}{\lambda\cdot T}}-1\right)}d\lambda}{\int\limits_{\lambda_1}^{\lambda_2}\frac{c_1}{\lambda^5\cdot\left(e^{\frac{c_2}{\lambda\cdot T}}-1\right)}d\lambda}. \quad (3)$$

Тобто можна зробити висновок, що на співвідношення щільностей випромінювання параметр ε_T не впливає, а впливають тільки значення температури розігрітого контактного дроту T та спектральні діапазони $\lambda_1 \div \lambda_2$ і $\lambda_3 \div \lambda_4$, у яких відбувається вимірювання. Причому у випадку, коли вимірювання відбуватимуться при різних температурах нагріву контактного дроту, значення співвідношення (3) також будуть відрізнятися.

Щільність випромінювання $R_{\lambda_1-\lambda_2}$ пов'язана з енергетичною яскравістю $L_{\lambda_1-\lambda_2}$ співвідношенням:

$$R_{\lambda_1-\lambda_2}=\pi\cdot L_{\lambda_1-\lambda_2}. \quad (4)$$

З урахуванням (4) енергетична яскравість контактного дроту в спектральних діапазонах $\lambda_1 \div \lambda_2$ і $\lambda_3 \div \lambda_4$ дорівнює:

$$L_{\lambda_1-\lambda_2}=\frac{R_{\lambda_1-\lambda_2}}{\pi},$$

$$L_{\lambda_3-\lambda_4}=\frac{R_{\lambda_3-\lambda_4}}{\pi}.$$

Енергетична опроміненість теплового приймача залежить від енергетичної яскравості контактного дроту, кутової апертури об'єктива пірометра в площині зображення $\tan\omega'$, площі контактного дроту, що потрапляє в межі поля зору оптичної системи пірометра $S_{еф}$ та коефіцієнта пропускання оптичної системи пірометра та атмосфери. Величина $S_{еф}$ визначається відстанню від контактного дроту до вхідної зіниці об'єктива пірометра, яка може змінюватись і кута поля зору Ω оптичної системи. В свою чергу Ω визначається розміром приймача випромінювання. Якщо вважати, що зображення ділянки контактного дроту будується поблизу фокальної площини об'єктива величина $\tan\omega'\approx\sin\omega'$ і дорівнює:

$$\sin\omega'=\frac{D}{2\cdot f'},$$

де D і f' діаметр вхідної зіниці і фокусна відстань об'єктива пірометра відповідно.

Спектральне пропускання системи визначається співвідношенням:

$$\tau_{\lambda_1-\lambda_2}=\tau_{o\,\lambda_1-\lambda_2}\cdot\tau_{a\,\lambda_1-\lambda_2},$$

де $\tau_{o\,\lambda_1-\lambda_2}$ – коефіцієнт пропускання об'єктиву пірометра; $\tau_{a\,\lambda_1-\lambda_2}$ – коефіцієнт пропускання випромінювання атмосферою. Приймемо: $\tau_{\lambda_1-\lambda_2}=\tau_{\lambda_3-\lambda_4}$. Тоді інтегральний потік випромінювання для двох спектральних діапазонів знаходиться за формулами:

$$\Phi_{\lambda_1-\lambda_2}=R_{\lambda_1-\lambda_2}\cdot S_{еф}\cdot\tau_{\lambda_1-\lambda_2}\cdot(\sin\omega')^2, \quad (5)$$

$$\Phi_{\lambda_3-\lambda_4}=R_{\lambda_3-\lambda_4}\cdot S_{еф}\cdot\tau_{\lambda_3-\lambda_4}\cdot(\sin\omega')^2. \quad (6)$$

Напруга на виході приймачів випромінювання пов'язана з інтегральним потоком і чутливістю теплових приймачів S_U співвідношеннями:

$$U_{\lambda_1-\lambda_2}=S_U\cdot\Phi_{\lambda_1-\lambda_2}, \quad (7)$$

$$U_{\lambda_3-\lambda_4}=S_U\cdot\Phi_{\lambda_3-\lambda_4}. \quad (8)$$

Треба зазначити, що чутливість термопарного приймача S_U залежить лише від теплової потужності і не залежить від спектрального діапазону.

Співвідношення напруги сигналів на виході термопарного приймача для спектральних діапазонів $\lambda_1 \div \lambda_2$ і $\lambda_3 \div \lambda_4$ з урахуванням (3÷8) має наступне значення:

$$\frac{U_{\lambda_3-\lambda_4}}{U_{\lambda_1-\lambda_2}}=\frac{S_U\cdot\Phi_{\lambda_3-\lambda_4}}{S_U\cdot\Phi_{\lambda_1-\lambda_2}}=\frac{S_U\cdot R_{\lambda_3-\lambda_4}\cdot S_{еф}\cdot\tau_{\lambda_3-\lambda_4}\cdot(\sin\omega')^2}{S_U\cdot R_{\lambda_1-\lambda_2}\cdot S_{еф}\cdot\tau_{\lambda_1-\lambda_2}\cdot(\sin\omega')^2}=\frac{\int_{\lambda_3}^{\lambda_4}\frac{c_1}{\lambda^5\cdot\left(e^{\frac{c_2}{\lambda\cdot T}}-1\right)}d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}\frac{c_1}{\lambda^5\cdot\left(e^{\frac{c_2}{\lambda\cdot T}}-1\right)}d\lambda}. \quad (9)$$

Проаналізувавши співвідношення (9), приходимо до висновку, що співвідношення напруги сигналів на виході термопарного приймача для спектральних діапазонів $\lambda_1\div\lambda_2$ і $\lambda_3\div\lambda_4$ не залежить від більшості параметрів, які мали б впливати на результат вимірювання, а визначається лише відношенням щільностей випромінювання в визначених спектральних діапазонах. Для цього відношення доцільно ввести поняття коефіцієнта спектрального співвідношення (КСС).

Проведені розрахунки і їх аналіз

КСС при моніторингу стану контактного дроту залізничного транспорту залежить від температури перегріву дроту внаслідок зносу поперечного перетину. Пірометр кріпиться на рамі, пов'язаній зі струмоприймачем, тому відстань від пірометра до дроту, з урахуванням незначних пересувань, відома заздалегідь. Користуючись попередніми співвідношеннями, проведемо аналіз КСС, отриманого пірометром спектрального співвідношення для розігрітого контактного дроту, який є сірим тілом з коефіцієнтом теплового випромінювання (КТВ) $\varepsilon=0.7$, для температур перегріву $T_1=50°+273=323\text{ K}$, $T_2=100°+273=373\text{ K}$, $T_3=140°+273=413\text{ K}$, в спектральних діапазонах $\lambda_1\div\lambda_2=3\div5$ мкм і $\lambda_3\div\lambda_4=8\div13$ мкм. Відстань від досліджуваного дроту до вхідної зіниці об'єктива пірометра складає 700 ± 100 мм. У якості приймача випромінювання використовуємо інтегральний термопарний датчик PerkinElmer TPS334|10 з площею чутливого елемента $0.7\times0.7\text{ мм}^2$, розміром вікна датчика 5.5 мм^2, чутливістю $75\frac{\text{В}}{\text{Вт}}$ [10]. Кут поля зору оптичної системи пірометра складає $2\Omega=5°$.

Результат обчислень КСС для двох спектральних діапазонів при температурах $T=323K\div413K$ показаний на рис. 1:

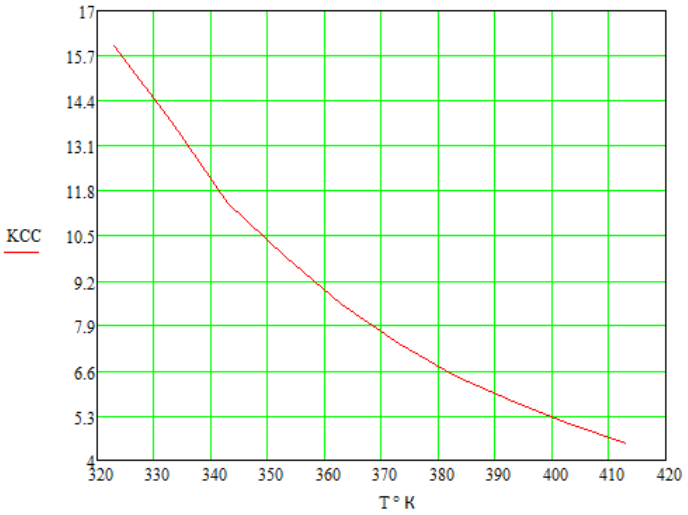


Рис. 1. Графік залежності коефіцієнта спектрального співвідношення від температури контактного дроту

Висновки

Провівши аналіз теоретичних співвідношень для значення коефіцієнта спектрального співвідношення, можна зробити висновок, що значення КСС не залежить від таких чинників, як відстань між дротом і пірометром, коефіцієнта випромінюючої здатності контактного дроту, коефіцієнта пропускання оптичної системи пірометра і атмосфери.

Приведений графік дає можливість при визначеному значенні КСС знайти температуру перегріву контактного дроту залізничного транспорту і прийняти рішення щодо відповідних регламентних робіт. Як видно на графіку з рис. 1 значення КСС знижується зі збільшенням температури перегріву контактного дроту. Наприклад, якщо КСС=13, то необхідний ремонт дроту в найближчий час з урахуванням

навантаження.

Література

1. Методы и средства контроля в кабельной промышленности : [методические указания к выполнению лабораторных работ для магистрантов, обучающихся по магистерской программе «Приборы и методы контроля качества и диагностики» направления 200100 «Приборостроение»] / сост. В. В. Редько, Е. М. Федоров. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 16 с.
2. Запускалов В. Г. Мобильный комплекс для управления динамическими параметрами троллейбусов электрифицированных железных дорог / В. Г. Запускалов, А. И. Маслов, Е.В. Арбузов, Е. О. Петренко, А. С. Мушкаров // Контроль. Диагностика. – 2002. – № 7. – С. 16–18.
3. Пат. на корисну модель № 129646 України. МПК (2018.01) G01B 11/00; G01B 11/16. Пристрій для контролю зносу контактного дроту залізничного транспорту / О.К. Кучеренко, Д. О. Вишневський. – Бюл. №21 від 12.11.2018.
4. Воронин А. В. Система диагностики контактного провода «Износ» / А. В. Воронин, В. И. Сиротинин, С. М. Шевяков, Ю. И. Федоров // Локомотив. – М. : Российские железные дороги. – 2013. – № 2(674). – С. 39–40.
5. Горшков Д. П. Современные методы определения износа контактной проволоки / Д. П. Горшков, В. М. Ступицкий // Иркутский железнодорожный транспортный университет. – 2017. – № 5. – С. 85–89.
6. Федоров Е. М. Измерение диаметра и эксцентриситета электрического кабеля на основе индуктивного оптического метода / Е. М. Федоров, А. Е. Гольдштейн, А. Р. Свендровский, В. В. Редько // Известия Томского политехнического университета. Технические науки. – 2005. – № 2. – С. 129–133.
7. Skibicki J. The new version of contact-less method for localization of catenary contact wire-theoretical assumption / J. Skibicki, M. Bartłomiejczyk // Przegląd elektroniczny. – 2013. – №7. – P. 100–104. – DOI: http://www.pe.org.pl/articles/2013/7/23.pdf
8. Сборник правил и инструкций по эксплуатации электрифицированных железных дорог. Правила построения и технической эксплуатации контактной сети электрифицированных железных дорог ЦЕ-197 [Електронний ресурс]. – Москва : ЗАО «ЭНЕРГОСПЕЦСЕРВИС», 2001. – Доп. 3. – Режим доступу : http://www.gosthelp.ru/text/CE197Pravilaustrojstvaite.html
9. Криксунов Л. Инфракрасные системы обнаружение, пеленгации и автоматического слежения за подвижными мишенями / Л. Криксунов, И. Усольцев. – 1-е изд. – Вашингтон : Совместная исследовательская служба публикаций, 1978. – 50 с.
10. Рынок микроэлектроники. PerkinElmer [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://www.compitech.ru/html.cgi/arhiv/03_02/stat_18.htm

References

1. Metody i sredstva kontrolja v kabel'noj promyshlennosti : [metodicheskie ukazanija k vypolneniju laboratornyh rabot dlja magistrantov, obuchajushhihsja po magisterskoj programme «Pribory i metody kontrolja kachestva i diagnostiki» napravlenija 200100 «Priborostroenie»] / sost. V. V. Red'ko, E. M. Fedorov. – Tomsk : Izd-vo Tomskogo politehnicheskogo universiteta, 2008. – 16 s.
2. Zapuskalov V. G. Mobil'nyj kompleks dlja upravlenija dinamicheskimi parametrami trollejbusov jelektrificirovannyh zheleznyh dorog / V. G. Zapuskalov, A. I. Maslov, E.V. Arbuzov, E. O. Petrenko, A. S. Mushkarov // Kontrol'. Diagnostika. – 2002. – № 7. – S. 16–18.
3. Pat. na korysnu model № 129646 Ukrainy. MPK (2018.01) G01B 11/00; G01B 11/16. Prystrii dlia kontroliu znosu kontaktnoho drotu zaliznychnoho transportu / O.K. Kucherenko, D. O. Vyshnevskyi. – Biul. №21 vid 12.11.2018.
4. Voronin A. V. Sistema diagnostiki kontaktnogo provoda «Iznos» / A. V. Voronin, V. I. Sirotinin, S. M. Shevjakov, Ju. I. Fedorov // Lokomotiv. – M. : Rossijskie zheleznye dorogi. – 2013. – № 2(674). – S. 39–40.
5. Gorshkov D. P. Sovremennye metody opredelenija iznosa kontaktnoj provoloki / D. P. Gorshkov, V. M. Stupickij // Irkutskij zheleznodorozhnyj transportnyj universitet. – 2017. – № 5. – S. 85–89.
6. Fedorov E. M. Izmerenie diametra i jekscentrisiteta jelektricheskogo kabelja na osnove induktivnogo opticheskogo metoda / E. M. Fedorov, A. E. Gol'dshtejn, A. R. Svendrovskij, V. V. Red'ko // Izvestija Tomskogo politehnicheskogo universiteta. Tehnicheskie nauki. – 2005. – № 2. – S. 129–133.
7. Skibicki J. The new version of contact-less method for localization of catenary contact wire-theoretical assumption / J. Skibicki, M. Bartłomiejczyk // Przegląd elektroniczny. – 2013. – №7. – P. 100–104. – DOI: http://www.pe.org.pl/articles/2013/7/23.pdf
8. Sbornik pravil i instrukcij po jekspluatacii jelektrificirovannyh zheleznyh dorog. Pravila postroenija i tehnicheskoj jekspluatacii kontaktnoj seti jelektrificirovannyh zheleznyh dorog CE-197 [Elektronnij resurs]. – Moskva : ZAO «JeNERGOSPECSERVIS», 2001. – Dop. 3. – Rezhim dostupu : http://www.gosthelp.ru/text/CE197Pravilaustrojstvaite.html
9. Kriksunov L. Infrakrasnye sistemy obnaruzhenie, pelengacii i avtomaticheskogo slezhenija za podvizhnymi mishenjami / L. Kriksunov, I. Usol'cev. – 1-e izd. – Vashington : Sovmestnaja issledovatel'skaja sluzhba publikacij, 1978. – 50 s.
10. Rynok mikrojelektroniki. PerkinElmer [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu : http://www.compitech.ru/html.cgi/arhiv/03_02/stat_18.htm

Рецензія/Peer review : 20.1.2019 р. Надрукована/Printed :16.2.2019 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Боровицький В.М.

DOI 10.31891/2307-5732-2019-269-1-249-253
УДК 621. 313.333.2

Е.Л. ПІРОТТІ
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
В.Є. КРИВОНОСОВ
Приазовський державний технічний університет
Л.Г. КОВАЛЬ, М.І. ПАЛАМАРЧУК
Вінницький національний технічний університет

АНАЛІЗ ДЖЕРЕЛ ФАКТОРІВ НЕГАТИВНОГО ВПЛИВУ НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНУ НАДІЙНІСТЬ СИЛОВОГО ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ (СЕТО) (ЗА ДАНИМИ ЛІТЕРАТУРНОГО КОНТЕНТУ)

У статті розглянуто основні причини, що впливають на якість електричних мереж, а саме: недостатній рівень надійності електропостачання для СЕТО; збільшення відносних втрат електроенергії в електромережах; невідповідність якості електроенергії вимогам реального сектора економіки; невідповідність сучасним технологічним реаліям системи управління енергопостачанням; погіршення технічного стану розподільчого електромережевого комплексу; відсутність накопичених статистичних даних; технологічний та електромагнітний збитки. Наведено статистичні дані поломок і аварій електротехнічного та медичного обладнання.

Ключові слова: електротехнічне обладнання, електричні мережі, поломки обладнання, провали напруги.

E. L. PIROTTI
National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”
V. YE. KRIVONOSOV
Pryazovskyi State Technical University
L. G. KOVAL, M. I. PALAMARCHUK
Vinnytsia National Technical University

ANALYSIS OF SOURCES OF NEGATIVE INFLUENCING FACTORS ON PERFORMANCE OF POWER ELECTRICAL EQUIPMENT (SETO) (LITERATURE CONTENT DATA)

Modern electrical engineering systems and complexes are complex technical devices that contain electrical elements, mechanical units, electronic and microprocessor blocks, which operate on low voltage and high voltage voltages, with a power from CW and above. ESCs are installed, as a rule, in enclosed spaces, receive power supply on separate lines and have independent units of relay protection of uninterruptible power supply units. This results in operational failures and malfunctions caused by unpredictable changes in the network power supply parameters. Exit PAYE beyond the norm leads to the complication of troubleshooting and troubleshooting, as well as increasing financial and time costs. The lack of an integrated approach to considering the dichotomy "electrical equipment + power supply system" as a whole is one of the causes of unpredictable deviations in the normal operation of equipment, which leads to the receipt of inaccurate data about its technical condition. The solution of the problems raised is possible by improving the existing and developing new methods and tools that allow to introduce a system of diagnostics, forecasting and protection in the form of a single complex, which will increase the reliability and trouble-free operation of the ESC. Modern systems of transmission and distribution of energy are projected with a level of availability from 99.9 to 99.99%. This value strongly depends on the level of network redundancy, which differs depending on the geographical location and the voltage level (in the high-voltage network, the level of readiness is higher). In some remote regions, the readiness of transmission and distribution systems can be reduced to 99%. At the same time, even at 99.99%, the equivalent interruption time is 52 minutes. for a year. The article considers the main reasons influencing the quality of electric networks, namely: insufficient level of reliability of power supply for CETO; increase of relative electric power losses in electric grids; Electricity quality mismatch requirements of the real sector of the economy; inconsistency with modern technological realities of power supply management system; deterioration of the technical condition of the distribution electrical system complex; lack of accumulated statistical data; technological and electromagnetic losses. The statistics of breakdowns and accidents of electrical and medical equipment are presented.

Keywords: electrical equipment, electric networks, equipment breakdowns, voltage failures.

Вступ

Сучасні електротехнічні системи і комплекси є складними технічними пристроями, що містять електричні елементи, механічні вузли, електронні та мікропроцесорні блоки, які працюють на низьковольтній і високовольтній напругах, мають потужність від 30 кВт і вище. Встановлюються ЕСіК, як правило, в закритих приміщеннях, отримують електроживлення по окремих лініях і мають самостійні вузли релейного захисту блоків безперебійного живлення. Практика експлуатації ЕСіК показує, що вони досить чутливі до якості електроенергії українських 2- і 3-фазних мереж. Показник якості електроенергії (ПЯЕ) не враховується в процесі експлуатації обладнання, хоча в умовах поставки, він обумовлений. Це призводить до виникнення експлуатаційних відмов і несправностей, причинами яких є непрогнозовані зміни параметрів мережевої напруги живлення. Вихід ПЯЕ за межі норми, встановленої ГОСТ. 13109-97 призводить до ускладнення пошуку та діагностики несправності та її усунення, а також до збільшення фінансових і часових витрат.

Проведений нами і підтверджений колегами в Україні і за кордоном аналіз виникнення аварійних ситуацій і причин виходу ЕСіК з ладу, дозволяє розділити їх на [1]:

– внутрішні пошкодження, які викликані поломкою блоків через механічну зношеність елементів і вузлів; зниженням діелектричної міцності ізоляції, несвоєчасним проведенням технічного обслуговування;

помилками експлуатаційного персоналу і т. д;

– зовнішні пошкодження у вигляді поломок і збоїв в системі електропостачання – відмова комутаційної апаратури; зниження рівня ізоляції струмоведучих кабельних ліній; ослаблення контактних з'єднань струмопроводу і роз'ємів; неповнофазний режим мережі живлення; несанкціоновані відключення живлення; низька якість електроенергії та інші, що призводять до додаткових теплових втрат в елементах електропостачання;

– пошкодження, що виникають всередині ЕСіК через відхилення параметрів в системі електропостачання від значень, нормованих за ГОСТ 13109-97, несанкціонованих відключень напруги живлення, виникнення випадкових провалів напруги, що призводять до розвитку внутрішніх аварійних ситуацій і поломки ЕСІК.

Проблема

Відсутність комплексного підходу до розгляду дихотомії «електрообладнання + система електропостачання» як єдиного цілого є однією з причин виникнення непрогнозованих відхилень в нормальній роботі обладнання, що призводить до отримання недостовірних даних про його технічний стан.

Рішення поставлених проблем можливе за рахунок удосконалення Існуючих та розроблення нових методів і засобів, що дозволяють представити систему діагностування, прогнозування та захисту у вигляді єдиного комплексу «ЕСіК + система електропостачання», який підвищить надійність і безаварійність роботи ЕСіК.

Основний зміст статті

Сучасні системи передачі і розподілу енергії проектуються з рівнем доступності від 99,9 до 99,99%. Це значення сильно залежить від рівня резервування мережі, що відрізняється залежно від географічного положення і рівня напруги (в мережі високої напруги рівень готовності вище). У деяких віддалених регіонах готовність систем передачі й розподілу може опускатися до 99%. При цьому навіть при рівні 99,99% еквівалентний час переривання складає 52 хв на рік.

Для забезпечення належної роботи найвимогливіших процесів в сучасній «цифровій» економіці необхідно енергопостачання з рівнем готовності 99,9999999% (9 дев'яток). З 1992 по 2000 р EPRI проводив дослідження в США за визначенням середньої тривалості порушень.

Аварії, комутаційні перемикання і пошкодження в мережі живлення можуть бути причиною виникнення внутрішньої поломки обладнання або привести до порушення технологічного процесу, а для медичних закладів – отримання недостовірного результату обстеження хворого. Статистичні данні причин відключення, простою і припинення роботи СЕТО приведені в табл. 1 і табл. 2.

Таблиця 1

Статистичні дані поломок і аварій електротехнічного обладнання

№	Вид пошкодження	Кількість виходу із строю, %	Причина пошкодження
1	Електродвигуни потужністю 0,25 кВт	57	Неповнофазний режим мережі, заклинювання підшипників, ненормативне навантаження, теплове та механічне зношування ізоляції
2	Нагрівальні пристрої	17	Підвищена напруга, природне зношування
3	Пошкодження кабельних і струмоведучих ліній	8	Зношування ізоляції, механічне пошкодження
4	Послаблення болтових струмоведучих з'єднань	3	Не пов'язані з мережею живлення
5	Інверторно-випрямляючі пристрої	5	Перенапруження, провали напруги

Дані, наведені в табл. 2, показують, що до 14% причин виникнення аварій і непрацездатності медичного обладнання пов'язані з аварійними, технологічними, профілактичними та іншими відключеннями в мережі живлення, що приводять до неповнофазного режиму мережі, появи комутаційних перенапруг, несиметричних режимів і появою короткочасних провалів напруги.

Вимоги, що пред'являються до надійності і безпеки електропостачання медичних лабораторій, досліджені в [2]. Однак в роботі [2] недостатньо розглянуті питання захисту медичного обладнання при виникненні пошкоджень режимів в мережі живлення і струмоведучих з'єднань. Однією з причин простою обладнання є ослаблення струмоведучого з'єднання [3], що призводить до його перегріву, вигорання з'єднання, пошкодження комутаційної апаратури і коротких замикань в системі електропостачання. У роботах [4, 5] досліджені причини перегріву контактних з'єднань, запропоновані методи і пристрої контролю контактних з'єднань струмоведучих частин.

Головні струмоведучі провідники електрообладнання, в тому числі вимикачів, можуть перегріватися в будь-якій електроустановці, особливо в місцях контактних з'єднань. Ця ситуація потребує особливої уваги як з точки зору пожежної безпеки і цілісності обладнання, так і з точки зору безпеки обслуговуючого персоналу.

Таблиця 2

Статистичні дані поломок і аварій медичного обладнання

№	Вид пошкодження	Кількість виходу зі строю, %	Причина пошкодження
1	Відсутність напруги живлення	3–5	Пошкодження силового і комутаційного обладнання, планові і аварійні перемикання мережі
2	Відсутність струму в одній із фаз живлення	5–7	Неповнофазний режим мережі живлення, обрив струмоведучого з'єднання, послаблення контакту струмоведучого з'єднання
3	Аварійне відключення і поломка інвентарю	3-4	Провал напруги в мережі живлення протягом більше 0,1 с
4	Внутрішні поломки і аварії	80–84	Не пов'язані з мережею живлення

Серед основних причин перегріву можна виділити підвищений перехідний опір внаслідок поганого контактного з’єднання. Точки нагріву можуть виникнути через нещільне з'єднання, окислення чи корозії, несправності компонентів. Такими точками частіше всього являються роз’ємні і нероз’ємні контактні з'єднання, затискачі в струмопроводі, головні струмоведучі контакти в комутаційних електроапаратах, точки болтового приєднання головних шин до вимикача [6].

При цьому потужність теплових втрат в струмопроводі визначається формулою [6]:

$$P = I^2 \rho \frac{l}{q} K_Д , \quad (1)$$

де I^2 – струм, який протікає в провіднику;

ρ – питомий опір матеріалу провідника;

l – довжина провідника;

q – переріз провідника;

$K_Д$ – коефіцієнт додаткових втрат, що враховує явище поверхневого ефекту і ефекту близькості.

Із (1) слідує, що великий вплив на потужність теплових втрат має активний опір, який виражається через співвідношення питомого опору, довжини і перерізу $R=\rho*l/q$.

Електричні контакти є слабкою ланкою в будь-яких системах розподілу енергії, управління промисловими процесами та машинами у всіх областях людської діяльності від енергетики до космічної техніки. Тому забезпечення їх надійності та моніторингу приділяється все більша увага [7–10].

Термін служби пристроїв електропостачання, діагностика стану яких ускладнена, значно менший нормативного. Одне зі слабких місць діагностики і контролю пристроїв електропостачання – це місця необґрунтованого підвищеного нагріву, зокрема контактні з’єднання (КЗ).

Для зібрання в електричний ланцюг шин, проводів і кабелів з струмопровідними жилами з міді, алюмінію і його сплавів використовуються з'єднання. Такі сполуки мають високу несучу здатність і надійністю, прості при монтажі, демонтажі і заміні деталей. Різьблення мають понад 60% деталей, що входять до складу електроустановок. Застосування різьбових з'єднань дозволяє забезпечувати задані розрахункові зусилля стиснення контакт-деталей. Основним недоліком таких з'єднань є локальна концентрація механічних напружень на ділянках різьблення малої площі, що з часом призводить до ослаблення зусилля контактного натискання, особливо при вібраціях, коливаннях температури і при впливі циклічних механічних навантажень, характерних для умов експлуатації СЕТО. За даними [11], аварійність в електричних мережах через порушення роботи контактних з'єднань становить 10% загального числа аварій.

Основним методом неруйнівного контролю визначень цілісності КЗ є тепловий – контактне і безконтактне вимірювання температури КЗ і електричний – вимірювання омічного опору КЗ. Ці вимірювання в більшості випадків проводяться в рамках системи оглядів і планово-попереджувального ремонту електрообладнання [12–14].

Довговічність і надійність роботи електрообладнання залежить від збереження властивостей електричної ізоляції. Причинами зміни властивостей ізоляції при її експлуатації являється зміна фізико-хімічних властивостей складових її матеріалів і вплив комплексу зовнішніх і внутрішніх факторів. У кінцевому підсумку відмову ізоляції можна кваліфікувати як результат поступового або раптового погіршення фізико-хімічних властивостей матеріалу до рівня, при досягненні якого подальша надійна експлуатація ізоляції або обладнання стає неможливою [2].

Розрізняють об'ємну провідність ізоляції G_v, чисельно визначальну провідність через товщину ізоляції і поверхневу провідність ізоляції G_s, що характеризує наявність шару підвищеної електропровідності на поверхні розділу твердої ізоляції з навколишнім газоподібним чи рідким середовищем. Відповідно вводяться поняття об'ємного струму витоку I_v і поверхневого струму витоку I_v, а також об'ємного опору ізоляції R_v і поверхневого опору ізоляції R_s. Питомий опір твердих діелектриків залежить від багатьох факторів: температури, вологості, прикладеної напруги і напруженості електричного

поля. При підвищенні температури питомий опір електроізоляційних матеріалів, як правило, істотно зменшується. Так, при підвищенні температури ізоляції від 15°С до 50°С струми витоку збільшуються в 10–15 разів. Вплив температури на термін служби ізоляції від температури, при якій вона працює широко досліджений [4, 5], де за основу аналізу прийнятий емпіричний закон Вант Гофф-Арреніуса. Відповідно до цього закону, підвищення температури на кожні вісім градусів призводить до скорочення терміну служби ізоляції вдвічі. Емпіричний закон Вант Гофф-Арреніуса пов'язує константу швидкості хімічної реакції з температурою процесу при вивченні закономірностей термічного старіння ізоляції.

Причинами провалів напруги є короткі замикання, які в свою чергу обумовлюються низкою об'єктивних і суб'єктивних причин: удари блискавки, забруднення ізоляції, механічні пошкодження опор, спрацьовування релейного захисту, дотик проводів сторонніми предметами, помилкові дії оперативного та ремонтного персоналу тощо Згідно зі статистикою, 70% пошкоджень в повітряних мережах 110 кВ доводиться на однофазні короткі замикання (ОКЗ), 20% – на двофазні або двофазні на землю і 10% – трифазні. При визначенні значень показників провалів напруги згідно з [2] використовують допоміжні параметри електричної енергії, але нормується тільки один – тривалість провалу напруги, гранично допустиме значення якої в електричних мережах напругою до 20 кВ не повинно перевищувати 30 с.

У табл. 3 наведено рівні і час провалів напруги в системах електропостачання [15]. Відчутний вплив провалів напруги надають на безперервні технологічні процеси в хімії, нафтохімії, нафтопереробки металургії тощо галузях, такі технологічні процеси при зупинці і здійснення пуску вимагають тривалого часу – від кількох годин до кількох діб при суворому дотриманні технологічного регламенту.

Таблиця 3

Провали і переривання напруги в електричних мережах

Амплітуда, % $U_{ном}$	Кількість провалів і переривань в рік				
	Всього	В тому числі тривалістю, с			
		Від 0,01 до< 0,10	Від 0,10 до <0,50	Від 0,50 до < 1	Від 1 до < 3
від 10 до 30	145	61	66	12	6
від 30 до 60	49	8	36	4	1
від 60 до 100	24	2	17	3	2
100	41	0	12	24	5
	259	71	131	43	14
	100%	27,4%	50,6%	16,6%	5,4%

З особливою увагою варто підходити до захисту дорогого діагностичного обладнання, наприклад, магнітно-резонансних і комп'ютерних томографів. Складне обладнання високої точності дуже чутливо до будь-яких перешкод в мережі живлення, навіть мінімальні відхилення напруги можуть привести до серйозних збоїв в роботі. Ці дорогі системи потребують особливо суворого дотримання стандартів забезпечення електроживлення і висувають високі вимоги до джерел безперебійного живлення [16–18].

Висновки

Проведений аналіз літературних джерел показав, що до основних причин, що впливають на якість електричних мереж слід віднести недостатній рівень надійності електропостачання для СЕТО; збільшення відносних втрат електроенергії в електромережах; невідповідність якості електроенергії вимогам реального сектора економіки; невідповідність сучасним технологічним реаліям системи управління енергопостачанням; погіршення технічного стану розподільчого електромережевого комплексу; відсутність накопичених статистичних даних; технологічний та електромагнітний збитки.

Література

1. Коверникова Л. И. О комплексном подходе к управлению качеством єлектрической енергии / Л. И. Коверникова // Энергетика России в XXI веке. Инновационное развитие и управление : сб. статей всероссийской конференции. – Иркутск : ИСЭМ СО РАН, 2015. – С. 256–264.

2. Экономические аспекты качества электроэнергии [Електронный ресурс]. – Режим доступа : http://ldiomovelectro.ru/articles/ekonomicheskie-aspekty-kachestva-elektro energii.html

3. Barrett J.F., Keat N. Artifacts in CT: Recognition and Avoidance // Radio Graphics. – 2004. – Vol. 24. – P. 1679–1691.

4. Bhattacharjee S. A modified scalar control strategy of an induction motor with applications in traction / S. Bhattacharjee // IAEME Intl. J. Elec. Engg. Tech. – 2012. – Vol. 3, Issue 2. – P. 394–04.

5. Braunovic M. Performance of Utility Power Connectors in a Saline Environment / M. Braunovic, B. Johnson // IEEE TDCE. – 2001. – Vol. 2. – P. 781–786.

6. Kirtley J. L. 6.685 Electric Machines / Massachusetts Institute of Technology / J. L. Kirtley. – MIT OpenCourseWare, 2005.

7. Балаков Ю. Н. Исследование электрических характеристик неподвижных контактных соединений : автореф. дис. … канд. техн. наук : 05.02.04 / Балаков Ю. Н. – М., 1978. – 18 с.

8. Бернштейн Л. М. Изоляция электрических машин общего назначения / Л. М. Беруштейн. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1981. – 376 с.

9. Брон О. Б. Прогнозирование поведения замкнутых контактов при длительной эксплуатации в различных средах / О. Б. Брон, Б. Э. Фридман, М. Е. Евсеев // Электротехника. – 1978. – № 2. – С. 5–7.

10. Брон О. Б. Тепловое сопротивление контактов. Нагревание несимметричных контактов / О. Б. Брон, М. Е. Евсеев // Электрические контакты. – М. : Наука, 1965. – С. 128–131.

11. Braunovic M. A Model for Life Time Evaluation of Closed Electrical Contacts / M. Braunovic, V.V. Izmailov, M.V. Novoselova // Proceedings of the 51 IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. – Chicago, Sept. 2005. – P. 217–223.

12. Mutic S., Palta J.R., Butker E.K., Das I.J., Huq M.S., Loo L.N., Salter B.J., McCollough C.H., Van Dyk J.: отчет AAPM Целевая группа Комитета по лучевой терапии Quality Assurance for Computed Tomography Simulators and the Computed Tomography Simulation Process: AAPM Report Task Force on the Radiotherapy Committee № 66. Med Phys. 2003 окт., ЗО (10): 2762–92.

13. Сыромятников И. А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / под ред. М. Л. Мамиконянца. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.

14. Щапов П. Ф. Теоретичні та практичні засаби систем контролю та діагностування складних промислових об'єктів : монографія / П, Ф. Щапов, Р. П. Мігущенко, О. Ю. Кропачек. – Харків : Вид-во «Підручник НТУ "ХПГ», 2015. – 244 с.

15. Classification of Visual and Mechanical Defects for Equipment Electronic. Wire and other Defects (Non Electronic) MIL-STD-252V(1Z) 1970.

16. Mathur R. M. Thyristor-based facts controllers for electrical transmission systems / R. M. Mathur, R. K. Varma. – IEEE Press, Piscataway, 2002. – 518 p.

17. Najjar M., Heydt G. T. A hybrid nonlinear least squares estimation of harmonic signal levels in power systems // IEEE Trans. Power Delivery. – 1991. – Vol. 6, no. l. – P. 282–288.

18. А.с. № 1367106 СССР МПК Н02К15\2. Устройство защиты изоляции обмоток электродвигателей от увлажнения / Жежеленко И. В., Липский А. М., Кривоносов В. Е. – опуб. 1988.

References

1. Kovernikova L. I. O kompleksnom podhode k upravleniju kachestvom єlektricheskoj energii / L. I. Kovernikova // Jenergetika Rossii v XXI veke. Innovacionnoe razvitie i upravlenie : sb. statej vserossijskoj konferencii. – Irkutsk : ISJeM SO RAN, 2015. – S. 256–264.

2. Jekonomicheskie aspekty kachestva jelektrojenergii [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : http://ldiomovelectro.ru/articles/ekonomicheskie-aspekty-kachestva-elektro energii.html

3. Barrett J.F., Keat N. Artifacts in CT: Recognition and Avoidance // Radio Graphics. – 2004. – Vol. 24. – P. 1679–1691.

4. Bhattacharjee S. A modified scalar control strategy of an induction motor with applications in traction / S. Bhattacharjee // IAEME Intl. J. Elec. Engg. Tech. – 2012. – Vol. 3, Issue 2. – P. 394–04.

5. Braunovic M. Performance of Utility Power Connectors in a Saline Environment / M. Braunovic, B. Johnson // IEEE TDCE. – 2001. – Vol. 2. – R. 781–786.

6. Kirtley J. L. 6.685 Electric Machines / Massachusetts Institute of Technology / J. L. Kirtley. – MIT OpenCourseWare, 2005.

7. Balakov Ju. N. Issledovanie jelektricheskih harakteristik nepodvizhnyh kontaktnyh soedinenij : avtoref. dis. … kand. tehn. nauk : 05.02.04 / Balakov Ju. N. – M., 1978. – 18 s.

8. Bernshtejn L. M. Izoljacija jelektricheskih mashin obshhego naznachenija / L. M. Beryshtejn. – 3-e izd., pererab. i dop. – M. : Jenergoatomizdat, 1981. – 376 s.

9. Bron O. B. Prognozirovanie povedenija zamknutyh kontaktov pri dlitel'noj jekspluatacii v razlichnyh sredah / O. B. Bron, B. Je. Fridman, M. E. Evseev // Jelektrotehnika. – 1978. – № 2. – S. 5–7.

10. Bron O. B. Teplovoe soprotivlenie kontaktov. Nagrevanie nesimmetrichnyh kontaktov / O. B. Bron, M. E. Evseev // Jelektricheskie kontakty. – M. : Nauka, 1965. – S. 128–131.

11. Braunovic M. A Model for Life Time Evaluation of Closed Electrical Contacts / M. Braunovic, V.V. Izmailov, M.V. Novoselova // Proceedings of the 51 IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. – Chicago, Sept. 2005. – P. 217–223.

12. Mutic S., Palta J.R., Butker E.K., Das I.J., Huq M.S., Loo L.N., Salter V.J., McCollough C.H., Van Dyk J.: otchet AARM Celevaja gruppa Komiteta po luchevoj terapii Quality Assurance for Computed Tomography Simulators and the Computed Tomography Simulation Process: AAPM Report Task Force on the Radiotherapy Committee № 66. Med Phys. 2003 okt., ZO (10): 2762–92.

13. Syromjatnikov I. A. Rezhimy raboty asinhronnyh i sinhronnyh dvigatelej / pod red. M. L. Mamikonjanca. – M. : Jenergoatomizdat, 1984. – 240 s.

14. Shhapov P. F. Teoretichni ta praktichni zasabi sistem kontrolju ta diagnostuvannja skladnih promislovih ob'ektiv : monografija / P, F. Shhapov, R. P. Migushhenko, O. Ju. Kropachek. – Harkiv : Vid-vo «Pidruchnik NTU "HPG», 2015. – 244 s.

15. Classification of Visual and Mechanical Defects for Equipment Electronic. Wire and other Defects (Non Electronic) MIL-STD-252V(1Z) 1970.

16. Mathur R. M. Thyristor-based facts controllers for electrical transmission systems / R. M. Mathur, R. K. Varma. – IEEE Press, Piscataway, 2002. – 518 p.

17. Najjar M., Heydt G. T. A hybrid nonlinear least squares estimation of harmonic signal levels in power systems // IEEE Trans. Power Delivery. – 1991. – Vol. 6, no. l. – P. 282–288.

18. A.s. № 1367106 SSSR MPK H02K15\2. Ustrojstvo zashhity izoljacii obmotok jelektrodvigatelej ot uvlazhnenija / Zhezhelenko I. V., Lipskij A. M., Krivonosov V. E. – opub. 1988 g.

Рецензія/Peer review : 24.1.2019 р. Надрукована/Printed :16.2.2019 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Кичак В.М.

DOI 10.31891/2307-5732-2019-269-1-254-266
УДК 524.8:530.1:537.8:539.1

Ю.П. ЗАСПА
Хмельницький національний університет

КООПЕРАТИВНА ДИНАМІКА, ВЗАЄМОІНДУКЦІЯ, КОМПЛЕКСНА ТОПОЛОГІЯ ТА ГІПЕРКОМПЛЕКСНА ХРОНОЛОГІЯ ВИХОР-ХВИЛЬОВИХ ФОРМ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО, ГРАВІТАЦІЙНОГО, СИЛЬНОГО І СЛАБКОГО, А ТАКОЖ ГІДРОДИНАМІЧНОГО ПОЛІВ ПРОТИ ХИБНИХ СТАНДАРТІВ SM ТА ΛCDM

На основі гідродинамічно-хвильового калібрування потенціалів в системі рівнянь Максвелла для електромагнітного поля, а також в подібних системах для решти фундаментальних полів, проведено об'єднання цих полів. Розгляд ведеться в концепції комплексного Евклідового простору та гіперкомплексного троїстого часу за схемою взаємоузгоджених полів (а не за схемою заданих зарядів та струмів як джерел поля). Наявність ізотропних хвильових векторів у комплексному Евклідовому просторі забезпечує необмежену фазову швидкість поширення поля, що цілком суперечить постулатам теорій відносності Ейнштейна. Основою кооперативної динаміки полів виступає їх взаємоіндукція, в той час як самоіндукція поля формує когерентні структури руху. Боротьба цих двох чинників визначає еволюцію системи. Показано, що електричний заряд та гравітаційна маса є топологічно-хронологічними особливостями відповідних полів. Встановлені кооперативні особливості в системах сильного і слабкого полів, віднесені до категорії магнітних зарядів, які обумовлюють короткодіючий характер ядерних сил та заміщують собою гіпотетичні магнітні монополі Дірака в системі електромагнітного поля. Розраховані польові складники мас електрона, протона, нейтрона, π -, K -мезонів, μ -, τ -лептонів, гіперонів та резонансів. Відмічено, що цілісність електрона забезпечується кооперативною взаємодією електричного та двох різнойменних магнітних зарядів, розподілених в межах комптонівського радіусу електрона, за відсутності уявного точкового електричного заряду, покладеного в основу всіх розрахунків квантової електродинаміки. Встановлена польова природа спіну та магнітного моменту елементарних частинок. Аналізується каскадний транспорт енергії в мікро- та макрокосмічних системах фундаментальних полів, а також зв'язок цих полів з гідродинамічним полем швидкостей елементів матеріального середовища. Встановлена топологічна основа спільних форм сильного, слабкого та гідродинамічного полів, виражена у мінімізації магнітної енергії та гідродинамічної енстрофії у виділених областях простору при збереженні спінової спіральності полів у цих областях. Вирішена проблема прихованої маси і темної енергії у Космосі. Наголошено на недостатності Лоренц-інваріантних форм матерії та вільного поля, якими оперують сучасні квантові теорії, зациклені на обмінній взаємодії віртуальними частинками. Робиться висновок про цілковиту неадекватність стандартів SM та ΛCDM, побудованих на хибному сприйнятті фундаментальних понять простору і часу, а також фізичного поля.

Ключові слова: фундаментальні поля, кооперативна динаміка, взаємоіндукція, комплексний Евклідів простір, гіперкомплексний троїстий час, ізотропний вектор, маса, магнітний заряд, спін, магнітний момент, спінова спіральність, енстрофія, енергетичний каскад, темна енергія.

YU. P. ZASPA
KhmelnytskyNationalUniversity

COOPERATIVE DYNAMICS, MUTUAL INDUCTION, COMPLEX TOPOLOGY AND HYPERCOMPLEX CHORONOLOGY OF VORTEX-WAVEFORMS OF ELECTROMAGNETIC, GRAVITATIONAL, STRONG AND WEAK, AS WELL AS HYDRODINAMIC FIELDS VERSUS THE FALSE STANDARDS OF SM AND ΛCDM

On the basis of hydrodynamic-wave calibration of potentials in the Maxwell's equations system for electromagnetic field, as well as in similar systems for the rest of fundamental fields, the unification of these fields was carried out. The investigation was carried out in the concept of complex Euclidean space and the hypercomplex trihedral time basing on the field interpolation scheme (but not on the scheme of set charges and currents as field sources). The presence of isotropic wave vectors in the complex Euclidean space provides an unlimited phase velocity of the field spreading, that completely contradicts the postulate of the Einstein's theory of relativity. The core of the fields cooperative dynamics is their mutual induction, while the selfinduction forms coherent structures of motion. The struggle of these two factors determines the evolution of the system. It was displayed that the electric charge and gravitational mass are the topological-chronological features of the corresponding fields. Established cooperative peculiarities in systems of strong and weak fields, have been classified as the part of magnetic charges category, which determines the short-acting nature of nuclear forces and replaces the hypothetical Dirac's magnetic monopolies in the system of electromagnetic field. The field components of the masses of electron, proton, a neutron, π -, K -mesons, μ -, τ - leptons, hyperons and resonances have been calculated. It was noted that the integrity of the electron is ensured by the co-operative interaction of electric and two different magnetic charges distributed within the Compton radius of an electron in the absence of an imaginary point electric charge, which is the basis of all calculations of quantum electrodynamics. The field nature of the spin and the magnetic moment of elementary particles was established. The cascade energy transport in the micro-and macrocosmic systems of fundamental fields is analyzed, as well as the connection of these fields with the hydrodynamic field of velocities of the elements of the material space. The topological basis of the common forms of strong, weak and hydrodynamic fields, expressed in minimization of the magnetic energy and hydrodynamic enstrophy in the isolated areas of space while maintaining the spin helicity of the fields in these areas was established. The problem of hidden mass and dark energy in Space was solved. The lack of Lorentz-invariant forms of matter and free field, which are used in modern quantum theories, focused on the exchange interaction with virtual particles was emphasize. There was made a conclusion about the complete inadequacy of the SM and ΛCDM standards built on the misunderstanding of the fundamental concepts of space and time, as well as physical field.

Key words: fundamental fields, cooperative dynamics, inductive coupling, complex Euclidean space, hypercomplex trihedral time, isotropic vector, mass, magnetic charge, spin, magnetic moment, spin helicity, enstrophy, energy cascade, dark energy.

Вступ

Лоренцеве калібрування потенціалів в рівняннях Максвелла [1] вийшло далеко за межі електромагнетизму, ставши математичною основою спеціальної та загальної теорій відносності, які декларують Лоренц-інваріантність всіх законів природи, чотирьохвимірність простору-часу та визначальний вплив матерії на метрику останнього [1, 2]. Ці теорії в поєднанні з квантовими теоріями поля, в свою чергу, лягли в основу сучасних фізичних стандартів в галузях мікро- та макрокосмосу: стандартної моделі фундаментальних взаємодій (SM – Standard Model) та стандартної космологічної моделі (ΛCDM – LambdaColdDarkMatter) [3–7]. Сучасний матеріалізм, гіпертрофуючи ідею квантів та оперуючи такими поняттями, як «віртуальні частинки», «фізичний вакуум» і т.п., стикається з принциповими труднощами об'єднання фундаментальних полів, пояснення природи маси, заряду, спіну, магнітного моменту елементарних частинок, наявності прихованої маси й «темної енергії» у Космосі і т.д. Вирішення цих та інших проблем сучасної фізики виходить за рамки квантової парадигми та штучно нав'язаної геометрії простору-часу Мінковського–Ейнштейна [1, 2]. Слід врешті відновити початкову ідею континуального фізичного поля Ейлера–Фарадея–Максвелла, розпорошену теоретиками SM на 12 вельми довільно вибраних «полів матерії» [3–5]. Це потребує відповідного розширення фізичних понять простору та часу за рахунок переходу до комплексного Евклідового простору та гіперкомплексного троїстого часу [8]. В такому розширенні виявляється невідоме досі гідродинамічно-хвильове калібрування потенціалів в рівняннях Максвелла та в їх аналогах, записаних для решти фундаментальних полів. Воно становить пряму альтернативу калібруванню Лоренца, забезпечуючи кооперативну індукційну динаміку вихор-хвильових форм поля. Відповідні результати наводяться нижче.

Гідродинамічно-хвильове калібрування потенціалів в рівняннях Максвелла та в їх аналогах для гравітаційного поля.

Окремі аспекти такого калібрування розглядались раніше [8–10]. Перехід від звичного вектор-потенціалу $\vec{A}$ електромагнітного поля (у використаній тут Гаусовій системі одиниць) до вектор-потенціалу $\vec{\mathrm{V}}$ з розмірністю швидкості здійснюється за співвідношенням:

$$\vec{A} = \frac{c}{\sqrt{g}} \cdot \vec{\mathrm{V}}, \tag{1}$$

де c – швидкість світла у вакуумі, g – калібрувальна константа з розмірністю сталої всесвітнього тяжіння. Скалярний потенціал поля φ вводиться через градієнт половинного квадрата вектор-потенціалу:

$$\varphi = \vec{\nabla}(\vec{\mathrm{V}})^2 / 2. \tag{2}$$

Таке калібрування потенціалів іменується гідродинамічно-хвильовим, зважаючи на певні аналогії з основним рівнянням класичної гідродинаміки – рівнянням Ейлера, а також з гідродинамічним рівнянням Нав'є–Стокса [8–10].

Напруженості та індукції полів (з розмірністю прискорення) вводяться наступним чином:

$$\vec{\mathrm{E}} = -\frac{\partial \vec{\mathrm{V}}}{\partial t} - \vec{\nabla}(\vec{\mathrm{V}})^2 / 2, \ \vec{\mathrm{B}} = c \cdot rot\vec{\mathrm{V}} \tag{3, 4}$$

Рівняння Максвелла та їх аналоги записуються у вигляді:

$$rot\vec{\mathrm{B}} \mp \frac{\varepsilon\mu}{c}\frac{\partial \vec{\mathrm{E}}}{\partial t} = \pm\frac{4\pi\mu g}{c} \cdot \vec{j} \tag{5}$$

$$rot\vec{\mathrm{E}} = -\frac{1}{c}\frac{\partial \vec{\mathrm{B}}}{\partial t} \tag{6}$$

$$\vec{\nabla}\vec{\mathrm{E}} = \pm 4\pi g\rho / \varepsilon, \ \vec{\nabla}\vec{\mathrm{B}} = 0 \tag{7, 8}$$

Тут ε, μ – параметри польового середовища, через які виражається квадрат фазової швидкості поширення поля:

$$\upsilon_{ph}{}^2 = \pm\frac{c^2}{\varepsilon\mu} \tag{9}$$

У (5, 7, 9) верхні знаки стосуються електромагнітного поля, нижні – гравітаційного поля. Запис рівняння (5) в наведеній формі (відмінній від класичної порядком складових) дозволяє співвіднести фундаментальні поля з інь-ян символікою давньокитайської філософії [8–10].

Величина ρ в (7) відображає об'ємну густину еквівалентної польової маси, пов'язану з відповідною густиною заряду ρ_e співвідношенням:

$$\rho = \rho_e / \sqrt{g} \tag{10}$$

Густина струму $\vec{j}$ в (5) визначається не зарядами, а полями:

$$\vec{j} = \rho \cdot \vec{\mathrm{V}} + \overrightarrow{j_{co}} = \rho \cdot \vec{\mathrm{V}} + \sigma_{co} \cdot (\vec{\mathrm{E}} + \frac{1}{c}\left[\vec{\mathrm{V}} \times \vec{\mathrm{B}}\right]), \tag{11}$$

де σ_{co} – кооперативна провідність системи польових форм, яка виражається через базовий параметр задачі – кооперативну в'язкість ν_{co}:

$$\sigma_{co} = \frac{c^2}{4\pi\mu g \nu_{co}} \tag{12}$$

Рішення системи (5–8) шукатимемо у хвильовому вигляді:

$$\vec{\mathrm{V}}(t, \vec{r}) = \vec{\mathrm{V}}_{\mathrm{a}} \cdot e^{i(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})} \tag{13}$$

де t – час, $\vec{r}$ – радіус-вектор, $\vec{\mathrm{V}}_{\mathrm{a}}$ – комплексна амплітуда, $\omega, \vec{k}$ – циклічна частота і хвильовий вектор певної форми поля, i – уявна одиниця.

Неоднозначність вибору потенціалів дозволяє покласти на них другу калібрувальну умову:

$$\pm\nu_{co} \cdot (\vec{k} \cdot \vec{\mathrm{V}} \mp 2\frac{\varepsilon\mu}{c^2}\omega \cdot (\vec{\mathrm{V}})^2) \cdot (\vec{k})^2 \mp \nu_{co} \cdot ((\vec{k})^2 \mp \frac{\varepsilon\mu}{c^2}\omega^2) \cdot (\vec{k} \cdot \vec{\mathrm{V}}) = i(\omega - \vec{k} \cdot \vec{\mathrm{V}}) \cdot (\vec{k} \cdot \vec{\mathrm{V}}) - \frac{\rho}{\sigma_{co}}(\vec{k} \cdot \vec{\mathrm{V}}) \tag{14}$$

Ця умова отримана в результаті підстановки (11, 13) в рівняння (5) та скалярного домноження результату на вектор $\vec{k}$. Рівняння (14) має два основних рішення:

1) $\omega = \vec{k} \cdot \vec{\mathrm{V}} \neq 0, (\vec{k})^2 = 0, \varepsilon = 0, \rho = 0, \upsilon_{ph}{}^2 \to \pm\infty$ (15–19)

2) $\vec{k} \cdot \vec{\mathrm{V}} = 0, (\vec{\mathrm{V}})^2 = 0, \varphi = 0$ (20–22)

Умови (15–19) відповідають індукційно-зв'язаним формам поля, умови (20–22) – вільним формам. У першому випадку ізотропним (в комплексному Евклідовому просторі) є хвильовий вектор $\vec{k}$, у другому – вектор-потенціал $\vec{\mathrm{V}}$. Умова (20) т.з. «поперечності» поля зазвичай використовується в квантових формах електромагнітного поля як сукупності фотонів з бездивергентним вектор-потенціалом [1, 11]. На противагу до цього, зосередимось на рішеннях (15–19), що описують кооперативні хвилі. Групова швидкість таких хвиль:

$$\overrightarrow{\upsilon_{gr}} = \frac{\partial\omega}{\partial\vec{k}} = \vec{\mathrm{V}} \tag{23}$$

Як видно, вона співпадає з вектор-потенціалом поля й приймає, взагалі кажучи, комплексні значення. Квадрат фазової швидкості хвиль задається виразом:

$$\upsilon_{ph}{}^2 = \frac{\omega^2}{(\vec{k})^2} = \pm\frac{c^2}{\varepsilon\mu} \tag{24}$$

Існує, однак, і третє рішення калібрувальної умови (14), яке визначає топологічно-хронологічні особливості поля:

3) $\omega^2 = 0, (\vec{k})^2 = 0$ (25, 26)

За таких умов

$$\upsilon_{ph}{}^2 = \lim_{\omega^2, (\vec{k})^2 \to 0} \frac{\omega^2}{(\vec{k})^2} = \pm c^2, \varepsilon \cdot \mu = 1, \tag{27, 28}$$

де верхній знак стосується електромагнітного поля, нижній – гравітаційного поля. Умова (27) фактично є визначенням сталої *c,* що відсутньо як у теоріях відносності [1, 2], так і в класичній [1], а також у квантовій [11] електродинаміці. Це визначення є прямим наслідком комплексного розширення Евклідового простору, несумісним зі спекуляціями обох теорій відносності.

Гідродинамічно-хвильове калібрування потенціалів в системах сильного і слабкого полів

Напруженості та індукції цих полів вводяться антисиметрично щодо пари електромагнітного та гравітаційного полів:

$$\vec{\mathrm{E}} = +\frac{\partial\vec{\mathrm{V}}}{\partial t}, \vec{\mathrm{B}} = -c \cdot rot\vec{\mathrm{V}} - \vec{\nabla}(\vec{\mathrm{V}})^2 / 2 \tag{29, 30}$$

Аналоги рівнянь Максвелла записуються у вигляді:

$$rot\vec{\mathrm{B}} \pm \frac{\varepsilon\mu}{c}\frac{\partial\vec{\mathrm{E}}}{\partial t} = \pm\frac{4\pi\mu g}{c} \cdot \vec{j} \tag{31}$$

$$rot\vec{E} = -\frac{1}{c}\frac{\partial\vec{B}}{\partial t} - \frac{1}{c}\frac{\partial}{\partial t}(\vec{\nabla}(\vec{V})^2/2) \quad (32)$$

$$\vec{\nabla}\vec{E} = \frac{\partial}{\partial t}(\vec{\nabla}\vec{V}), \vec{\nabla}\vec{B} = \pm 4\pi\mu g\rho \quad (33, 34)$$

Тут верхні знаки стосуються сильного поля, нижні – слабкого поля. Густина струму $\vec{j}$ записується в даному випадку у вигляді:

$$\vec{j} = \rho\cdot\vec{V} + \vec{j}_{co} = \rho\cdot\vec{V} + \sigma_{co}\cdot(\vec{E} - \frac{1}{c}\left[\vec{V}\times\vec{B}\right]) \quad (35)$$

Друга калібрувальна умова тут має вигляд:

$$-\nu_{co}\cdot((\vec{k})^2 \pm \frac{\varepsilon\mu}{c^2}\omega^2)\cdot(\vec{k}\cdot\vec{V}) + \nu_{co}\cdot(\vec{k})^2\cdot(\vec{k}\cdot\vec{V}) = \pm i((\omega + \vec{k}\cdot\vec{V})\cdot(\vec{k}\cdot\vec{V}) - (\vec{k})^2\cdot(\vec{V})^2) + 2\nu_{co}\cdot\frac{(\vec{V})^2}{c^2}(\vec{k})^2\cdot(\vec{k}\cdot\vec{V}) \quad (36)$$

Це рівняння, як і (14), має три системи рішень:

1) $\omega = -\vec{k}\cdot\vec{V} \neq 0, (\vec{k})^2 = 0, \varepsilon = 0, \rho = 0, \upsilon_{ph}{}^2 \to \pm\infty$ (37–41)

2) $\vec{k}\cdot\vec{V} = 0, (\vec{V})^2 = 0$ (42, 43)

3) $\omega^2 = 0, (\vec{k})^2 = 0$ (44, 45)

Умови (37–41) відповідають індукційно-зв'язаним формам полів, умови (42, 43) – вільним формам, умови (44, 45) – топологічно-хронологічним особливостям полів.

Групова швидкість зв'язаних форм:

$$\overrightarrow{\upsilon_{gr}} = \frac{\partial\omega}{\partial\vec{k}} = -\vec{V} \quad (46)$$

Як видно, вона направлена протилежно до вектор-потенціалу, що визначає релаксаційний характер оберненого енергетичного каскаду в системах сильного та слабкого полів.

За умов (44, 45):

$$\upsilon_{ph}{}^2 = \lim_{\omega^2,(\vec{k})^2\to 0}\frac{\omega^2}{(\vec{k})^2} = \mp c^2, \varepsilon\cdot\mu = 1, \quad (47, 48)$$

де верхній знак стосується сильного поля, нижній – слабкого поля. Наявність знаку мінус у правих частинах (27, 47) для гравітаційного та сильного полів унеможливлює поширення ілюзорних гравітонів загальної теорії відносності [1, 12], а також структур вільного сильного поля, які б характеризувались дійсною фазовою швидкістю.

Енергетичні співвідношення для полів

З рівняння (5) отримуємо умову енергетичного балансу в системах електромагнітного та гравітаційного полів:

$$(\vec{E} + \frac{1}{c}\left[\vec{V}\times\vec{B}\right])\cdot\vec{j} = \mp(\frac{\partial w}{\partial t} + \vec{\nabla}\vec{S}) \pm \frac{1}{4\pi\mu g}\vec{V}\cdot\left[\vec{B}\times rot\vec{B}\right] - \frac{\varepsilon}{4\pi gc}\cdot\left[\vec{V}\times\vec{B}\right]\cdot\frac{\partial\vec{E}}{\partial t}, \quad (49)$$

де введені позначення:

$$\vec{S} = \frac{c}{4\pi\mu g}\cdot\left[\vec{E}\times\vec{B}\right], w = w_e + w_m \quad (50, 51)$$

$$w_e = \pm\frac{\varepsilon(\vec{E})^2}{8\pi g}, w_m = \frac{(\vec{B})^2}{8\pi\mu g} \quad (52, 53)$$

Тут w_e, w_m, w – відповідно електрична, магнітна та сумарна густина енергії поля. Верхній ряд знаків у (49, 52) стосується електромагнітного поля, нижній – гравітаційного поля.

Для сильного і слабкого полів із (31) отримуємо відповідно:

$$(\vec{E} - \frac{1}{c}\left[\vec{V}\times\vec{B}\right])\cdot\vec{j} = \mp(\frac{\partial w}{\partial t} + \vec{\nabla}\vec{S}) \mp \frac{c\cdot rot\vec{V}}{4\pi\mu g}\cdot\frac{\partial}{\partial t}(\vec{\nabla}(\vec{V})^2/2) \mp \frac{1}{4\pi\mu g}\vec{V}\cdot\left[\vec{B}\times rot\vec{B}\right] - \frac{\varepsilon}{4\pi gc}\cdot\left[\vec{V}\times\vec{B}\right]\cdot\frac{\partial\vec{E}}{\partial t} \quad (54)$$

$$w_e = \mp\frac{\varepsilon(\vec{E})}{8\pi g}, w_m = \frac{c^2\cdot(rot\vec{V})^2}{8\pi\mu g} + \frac{c\cdot rot\vec{V}\cdot(\vec{\nabla}(\vec{V})^2/2)}{4\pi\mu g} \quad (55, 56)$$

Верхній ряд знаків у (54, 55) стосується сильного поля, нижній – слабкого поля. За умов (17, 39) електрична компонента густини енергії кооперативних хвиль у всіх системах полів зануляється. Магнітна компонента густини енергії в системах сильного та слабкого полів, як видно з (56), виражається безпосередньо через вектор-потенціали полів, а не через їх індукції. Напрям переносу хвильової енергії

співпадає з $\overrightarrow{\upsilon_{gr}}$, а не з $\vec{S}$.

Врахування взаємоіндукції польових форм

Наведені вище калібрувальні умови є суттєво нелінійними, що виключає застосування тут звичного для вільних полів принципу суперпозиції [1, 11]. Взаємоіндукція польових форм порушує ізотропність хвильових векторів окремих мод, що веде до наступного дисперсійного співвідношення [8–10]:

$$|\omega| = N_{ch} \cdot \nu_{co} \cdot \left|(\vec{k})^2\right| \tag{57}$$

де N_{ch} – параметр когерентності окремої моди. Використаємо наступні співвідношення:

$$\omega = \omega_R + i \cdot \omega_I, |\omega| = 2\pi / T \tag{58, 59}$$

$$\vec{k} = \overrightarrow{k_R} + i \cdot \overrightarrow{k_I}, \overrightarrow{k_R} \cdot \overrightarrow{k_I} = k_R \cdot k_I \cdot \cos\theta, k_R = k_I = \frac{2\pi}{\lambda} \tag{60–62}$$

$$\left|(\vec{k})^2\right| = ((k_R{}^2 - k_I{}^2)^2 + 4k_R{}^2 \cdot k_I{}^2 \cdot \cos^2\theta)^{1/2}, \tag{63}$$

де $\omega_R, \omega_I \overrightarrow{k_R}, \overrightarrow{k_I}$ – відповідно дійсні та уявні компоненти циклічної частоти та хвильового вектора, θ – кут між векторами $\overrightarrow{k_R}, \overrightarrow{k_I}$, λ – довжина хвилі. Тоді з (57) матимемо:

$$\lambda^2 / \tau = 4\pi\nu_{co} \cdot |\cos\theta|, \tau = N_{ch} \cdot T \tag{64, 65}$$

де τ – час життя структури поля. Він є нескінченно великим для ізотропних $\vec{k}$ $(\cos\theta = 0)$ та мінімальним для простих $\vec{k}$ $(\cos\theta = \pm 1)$. Вибір між цими двома крайніми випадками визначає недетерміновану еволюцію кооперативної системи польових форм.

Слід зауважити, що запис рівнянь Максвелла та їх аналогів у формах (5, 31) потребує внесення μ під знак ротора та винесення ε з-під знаку частинної похідної за часом (щодо оригінальної форми відповідного рівняння Максвелла). Така операція тривіальна лише в однорідних та ізотропних польових середовищах. Однак, на границях системи цей фактор веде до різкого посилення міжмодової взаємодії. Драматичне вирішення такого роду топологічно-хронологічних конфліктів між групами польових форм, що тяжіють до взаємоіндукції (умовно прості $\vec{k}$) та до самоіндукції (умовно ізотропні $\vec{k}$), ми регулярно спостерігаємо на поверхні Сонця в ході основного квазіодинадцятилітнього циклу сонячної активності . Результати цього конфлікту, досягаючи Землі, безпосередньо впливають на хід природних та соціальних процесів на нашій планеті.

Топологічні та хронологічні особливості електромагнітного та гравітаційного полів

За умов (25, 26) з виразу (52) отримуємо:

$$w_e = \mp \frac{\varepsilon \cdot (\vec{\nabla}(\vec{k} \cdot \vec{r}))^2 \cdot (\vec{\nabla})^4}{8\pi g}, \tag{66}$$

$$\text{де } \vec{\nabla}(\vec{k} \cdot \vec{r}) = \left[\vec{r} \times rot\vec{k}\right] + \vec{k} + (\vec{r} \cdot \vec{\nabla})\vec{k} \tag{67}$$

Застосуємо спрощення:

$$\left[\vec{r} \times rot\vec{k}\right] = 0, (\vec{r} \cdot \vec{\nabla})\vec{k} = \vec{r} \cdot (\vec{\nabla}\vec{k}), \vec{r} = r \cdot \overrightarrow{e_r}, \tag{68–70}$$

де $\overrightarrow{e_r}$ – орт радіус-вектора $\vec{r}$. Тоді з виразу (66) матимемо:

$$w_e = \mp \frac{\varepsilon \cdot (\vec{k} \cdot \vec{r}) \cdot (\vec{\nabla}\vec{k}) \cdot (\vec{\nabla})^4}{4\pi g} \tag{71}$$

З рівняння (7) у тому ж наближенні слідує:

$$(\vec{\nabla}\vec{k}) \cdot (\vec{\nabla})^2 \cdot (i + \vec{k} \cdot \vec{r}) = \pm\pi g\rho / \varepsilon \tag{72}$$

Застосуємо відповідно до сорту полів Кулонівське та Ньютонівське калібрування скалярного потенціалу:

$$(\vec{\nabla})^2 / 2 = \sqrt{g}\frac{e}{r}, (\vec{\nabla})^2 / 2 = -g\frac{m}{r}, \tag{73, 74}$$

де e – електричний заряд, m – гравітаційна маса. Густину заряду та маси задамо через дельта-функцію Дірака:

$$\rho = m \cdot \delta(\vec{r}) = \frac{e}{\sqrt{g}}\delta(\vec{r}) \tag{75}$$

Врахуємо співвідношення між масою та енергією спокою:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} w_e d\Upsilon = mc^2 = \frac{e}{\sqrt{g}} \cdot c^2 \tag{76}$$

звідки із врахуванням (66–75) слідує:

$$\mp mg \cdot (\overrightarrow{k^0} \cdot \overrightarrow{e_r^0}) = 2ic^2, \tag{77}$$

де $\overrightarrow{k^0}$ – хвильовий вектор в особливості поля, $\overrightarrow{e_r^0}$ – орт радіус-вектора в особливості. Верхні знаки в (66, 71, 72, 77) стосуються електромагнітного поля, нижні – гравітаційного поля. Враховуючи ізотропність хвильового вектора, з (77) знаходимо ефективний радіус особливості поля:

$$R_0 = (k^0)^{-1} = \frac{mg}{2c^2} = \frac{e \cdot \sqrt{g}}{2c^2}, \tag{78}$$

$$\text{де } k^0 = k_R^0 = k_I^0, \overrightarrow{k_R^0} \cdot \overrightarrow{k_I^0} = 0 \tag{79, 80}$$

Вираз (78) дозволяє оцінити калібрувальну константу g в космічних системах різного рангу. Для Землі, Сонця та квазара $Sgr-A*$ [9, 10] в центрі Галактики величина g відповідно становить: $\sim 2 \cdot 10^2, \sim 6 \cdot 10^{-2}, \sim 4 \cdot 10^{-7}$ (см^3/(г·c^2)), наближаючись по мірі зростання рангу до сталої всесвітнього тяжіння $G \approx 6.67 \cdot 10^{-8}$ см^3/(г·c^2). Це свідчить про різке зростання характерних швидкостей руху в особливостях гравітаційного поля, які в достатньо активних ядрах галактик порівняні зі швидкістю світла у вакуумі. Незрозуміла в рамках існуючих космологічних моделей активність таких ядер зазвичай відноситься на рахунок ілюзорних чорних дір [15, 16], гравітаційний радіус яких вчетверо перевищує отримане вище значення R_0.

З іншого боку, за відомим зарядом e протона, виходячи з його середньоквадратичного зарядового радіусу $R_0 \approx 8{,}14 \cdot 10^{-14}$ см [17], з (78) отримуємо значення $g \approx 9{,}3 \cdot 10^{34}$ см^3/(г·c^2) в динамічному польовому кооперативі протона. Для електрона, поле якого завузлене в межах комптонівського радіусу $R_0 \approx 3{,}86 \cdot 10^{-11}$ см, аналогічна величина на п'ять порядків вища: $g \approx 2{,}1 \cdot 10^{40}$ см^3/(г·c^2).

Кооперативні топологічні особливості в системах сильного і слабкого полів

За умов (44, 45) у наближеннях (68–70) з другої складової у правій частині (56) отримаємо:

$$w_m = c \cdot (\vec{\nabla}\vec{k}) \cdot (\vec{\mathrm{V}})^2 \cdot \vec{k} \cdot \left[\vec{r} \times \vec{\mathrm{V}}\right] \tag{81}$$

З рівняння (34) у тих же наближеннях слідує:

$$(\vec{\nabla}\vec{k}) \cdot (\vec{\mathrm{V}})^2 \cdot (i + \vec{k} \cdot \vec{r}) = \pm \pi \mu g \rho \tag{82}$$

Як і раніше, використаємо дельта-функцію Дірака та зв'язок маси з енергією спокою:

$$\rho = m \cdot \delta(\vec{r}), \int_{-\infty}^{+\infty} w_m d\Upsilon = mc^2, \tag{83, 84}$$

При підстановці (81–83) у (84) умовна маса m скорочується (на відміну від (75–77)). Натомість виникає спеціальна умова збіжності інтегралу у (84):

$$\vec{\mathrm{V}}(r) = \mathrm{V}(r) \cdot \overrightarrow{e_V}, \mathrm{V}(r) = (\alpha + i\beta) \cdot \frac{v_{co}}{r}, \tag{85, 86}$$

де $\alpha, \beta = 0, \pm 1$, $\overrightarrow{e_V}$ – орт вектор-потенціалу $\vec{\mathrm{V}}$, що вважається у даному випадку простим вектором (як і $\vec{r}$). Скалярний потенціал поля визначає наявність магнітних зарядів у кооперативних системах сильного і слабкого полів:

$$\varphi(r) = (\vec{\mathrm{V}})^2/2 = (\alpha + i\beta)^2 \cdot \frac{v_{co}^{\ 2}}{2r^2} \tag{87}$$

В такому випадку з (84) слідує:

$$\pm(\alpha + i\beta) \cdot v_{co} \cdot \overrightarrow{k^0} \cdot \left[\overrightarrow{e_r^0} \times \overrightarrow{e_V^0}\right] = 4ic \tag{88}$$

Верхній ряд знаків у (82, 88) стосується сильного поля, нижній – слабкого поля. Подальше розв'язання задачі потребує конкретизації параметрів α, β у (86–88). Розберемо деякі характерні випадки. Зокрема, для взаємного притягання магнітних зарядів нуклонів маємо:

$$\alpha, \beta = \pm 1, \varphi(r) = \pm i \cdot \frac{v_{co}^{\ 2}}{r^2} \tag{89, 90}$$

$$R_0 = (k^0)^{-1} = \frac{v_{co}}{2\sqrt{2}c} \cdot |\sin\varphi| \tag{91}$$

де

$$|\sin\varphi| = \left| \overrightarrow{e^0_{k_R - k_I}} \cdot \left[\overrightarrow{e^0_r} \times \overrightarrow{e^0_V} \right] \right| \tag{92}$$

Тут $\overrightarrow{e^0_{k_R - k_I}}$ – орт різничноговектора $\overrightarrow{k_R} - \overrightarrow{k_I}$ в особливості поля, $\overrightarrow{e^0_r}, \overrightarrow{e^0_V}$ – орти радіус-вектора та вектор-потенціалу поля в цій особливості, R_0 – ефективний радіус особливості поля (магнітного заряду).

У випадку різнойменних магнітних зарядів, наприклад, у складі електрона, матимемо:

$$\alpha = \pm 1,\ \beta = 0,\ \varphi(r) = +\frac{v_{co}^{\ 2}}{2r^2} \tag{93–95}$$

$$\alpha = 0,\ \beta = \pm 1,\ \varphi(r) = -\frac{v_{co}^{\ 2}}{2r^2} \tag{96–98}$$

Для цих випадків:

$$R_0 = (k^0)^{-1} = \frac{v_{co}}{4c} \cdot |\sin\psi| \tag{99}$$

де $$|\sin\psi| = \left| \overrightarrow{e^0_{k_I}} \cdot \left[\overrightarrow{e^0_r} \times \overrightarrow{e^0_V} \right] \right| \tag{100}$$

для випадку додатного потенціалу (95), а також

$$|\sin\psi| = \left| \overrightarrow{e^0_{k_R}} \cdot \left[\overrightarrow{e^0_r} \times \overrightarrow{e^0_V} \right] \right| \tag{101}$$

для випадку від'ємного потенціалу (98). Тут $\overrightarrow{e^0_{k_R}}$, $\overrightarrow{e^0_{k_I}}$ – орти векторів $\overrightarrow{k_R}$ та $\overrightarrow{k_I}$ в особливості поля.

Для всіх випадків можливе введення ефективного магнітного заряду e^*_m, що задається співвідношенням:

$$\frac{e^*_m}{r} = \frac{1}{\sqrt{g}}\varphi(r) = \frac{1}{\sqrt{g}}\frac{v_{co}^{\ 2}}{2r^2} \cdot (\alpha + i\beta)^2 \tag{102}$$

$$e^*_m(r) = \frac{1}{\sqrt{g}} \cdot \frac{v_{co}^{\ 2}}{2r} \cdot (\alpha + i\beta)^2 \tag{103}$$

Схематична залежність ефективного магнітного заряду від відстані до особливості поля показана на рис. 1а в порівнянні з відповідними залежностями для ефективних зарядів, прийнятих за основу розрахунків квантової електродинаміки (рис. 1б) та квантової хромодинаміки (рис. 1 в) [18]. Залежність (103) має фізичний зміст лише поза особливістю поля ($r \geq R_0$).

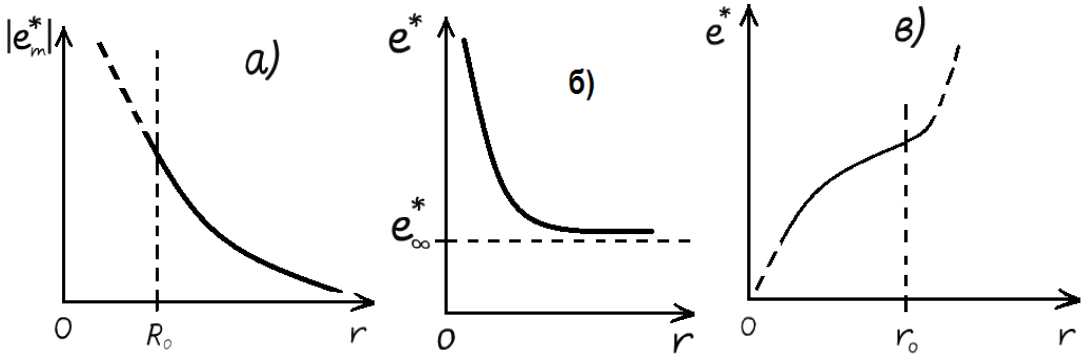


Рис. 1. Схематична залежність ефективного магнітного заряду від відстані до особливості поля (а) в порівнянні з відповідними залежностями для ефективних зарядів квантової електродинаміки (б) та квантової хромодинаміки (в) [17, 18]

Енергія взаємодії магнітних зарядів визначається співвідношенням:

$$W = e^*_{m1} \cdot \varphi_2 = \frac{1}{g} \cdot \frac{v_{co}^{\ 4}}{4r^3} \cdot (\alpha_1 + i\beta_1)^2 \cdot (\alpha_2 + i\beta_2)^2 \tag{104}$$

де φ_2 –потенціал поля другого заряду в місці знаходження першого заряду.

У випадку взаємного притягання нуклонів у ядрі та у випадку притягання різнойменних магнітних зарядів електрона ця енергія приймає суто дійсні від'ємні значення. В загальному ж випадку W набуває

комплексних значень. Різка залежність $W(r)$ визначає короткодіючий характер ядерних сил.

Для конкретизації параметрів $|\sin\varphi|, |\sin\psi|$ у (91, 99) приймемо ключове допущення про рівність електро-зарядових (78) та відповідних магнітно-зарядових (91, 99) радіусів протона, а також електрона (кожного окремо). Для енергії самоіндукції магнітних зарядів протона матимемо:

$$W = -\frac{16e^2}{R_0} \cdot \frac{1}{(\sin\varphi)^4} \tag{105}$$

Відповідно, для кожного сорту зарядів електрона:

$$W = +\frac{16e^2}{R_0} \cdot \frac{1}{(\sin\psi)^4} \tag{106}$$

Як доводить аналіз фактичних даних, у (105, 106) слід прийняти:

$$(\sin\varphi)^4 = (\sin\psi)^4 = 1/4 \tag{107}$$

Тоді з (105, 106) слідує:

$$W = \mp\frac{64e^2}{R_0} = \mp\frac{(8e)^2}{R_0}, \tag{108}$$

де верхні знаки стосуються протона, нижні – електрона. В даному випадку, як видно, можливо ввести одиницю магнітного заряду:

$$e_m = 8e \approx 3,84 \cdot 10^{-9} \text{ од. СГСЕ} \tag{109}$$

Це значення суттєво відрізняється від Діракового значення заряду гіпотетичного магнітного монополя в системі електромагнітного поля [18]:

$$\mu_D = (137/2)e \tag{110}$$

З (91, 99, 107) слідують наступні оцінки кооперативної в'язкості полів протона та електрона відповідно:

$$\nu_{co}{}^P \approx 9,7 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2\text{/с}, \ \nu_{co}{}^e \approx 6,5 \text{ см}^2\text{/с} \tag{111, 112}$$

Для порівняння: кооперативна в'язкість системи Земля–Місяць, за нашими оцінками [8–10], становить $\sim (2 \div 4) \cdot 10^5$ см^2/с, кооперативна в'язкість полів в межах Сонця, відповідно, $\sim (5 \div 9) \cdot 10^{12}$ см^2/с. Наявна різниця в порядках величини ν_{co} для динамічних польових кооперативів різного масштабу обумовлює каскадний характер транспорту енергії вихор-хвильових форм поля у Космосі.

Польові складники мас (енергій спокою) елементарних частинок

Електрон (позитрон) в SM та в квантовій електродинаміці вважається невизначено точковим ($r < 10^{-16}$ см) [17, 18]. В дійсності ж його електричний заряд, різнойменні магнітні заряди та відповідно маса розподілені в межах комптонівського радіусу $R_0 \approx 3.86 \cdot 10^{-11}$ см. Левова частка енергії спокою електрона припадає на самоіндукцію магнітних зарядів:

$$E_e^0 \approx 2 \cdot \frac{(8e)^2}{R_0} = 128\frac{e^2}{R_0} \le 137\frac{e^2}{R_0}, \tag{113}$$

де $137 \approx \alpha^{-1}$ – обернена величина постійної тонкої структури [17]. Відносно незначна різниця з фактом обумовлена тут необхідністю врахування енергії взаємоіндукції магнітних зарядів, а також другорядної за величиною електричної зарядової маси електрона.

Аналогічно енергія спокою протона визначається у переважній своїй частині енергією самоіндукції восьми магнітних зарядів ($\alpha = \beta = 1$):

$$E_p^0 \approx 8 \cdot \frac{(8e)^2}{R_0} = 512\frac{e^2}{R_0} \approx 910 \text{ МеВ}, \tag{114}$$

де $R_0 \approx 8,14 \cdot 10^{-14}$ см – зарядовий радіус протона [17]. Енергія спокою нейтрона близька до цієї величини (при $\alpha = 1, \beta = -1$).

Подібно до цього енергія спокою $\pi^{\pm}-, \pi^0-$ мезонів забезпечується в своїй переважній частині лише одним магнітним зарядом:

$$E_\pi^0 \approx \frac{(8e)^2}{R_0} = 64\frac{e^2}{R_0} \approx 130 \text{ МеВ}, \tag{115}$$

де $R_0 \approx 6,63 \cdot 10^{-14}$ см – зарядовий радіус $\pi^{\pm}-$ мезонів [17].

$K^{\pm}-, K^0$ – мезони містять по три магнітних заряди:

$$E_K^0 \approx 3 \cdot \frac{(8e)^2}{R_0} = 192 \frac{e^2}{R_0} \approx 500 \text{ МеВ}, \tag{116}$$

де $R_0 \approx 5,3 \cdot 10^{-14}$ см – зарядовий радіус $K^{\pm}-$ мезонів [17].

$\Lambda-, \sum-, \Xi-, \Omega-$ гіперони містять відповідно по 10, 10, 12 та 14 магнітних зарядів, які й визначають переважну частину маси цих частинок.

$\Lambda-, \sum-$ гіперони, які містять однакову кількість магнітних зарядів, відрізняються значеннями параметрів α, β.

Маси резонансів визначаються не тільки (і не стільки) другою складовою правої частини (56), пов'язаною з магнітними зарядами, але й першою складовою, пропорційною квадрату завихореності вектор-потенціалу поля. Вивільнення цієї енергії в процесах швидкого розпаду резонансів врешті приводить до квазістабільних або ж стабільних магнітно-зарядових конфігурацій поля.

$\mu^{\pm}-, \tau^{\pm}-$ лептони, що містять подібно до електрона (позитрона) по два різнойменних магнітних заряди, можуть умовно вважатись енергетично-напруженими аналогами електрона (позитрона). Їх релаксація, як відомо, йде з випромінюванням відповідних типів нейтрино (антинейтрино).

Часи життя елементарних частинок

Існуюче розділення сильної та слабкої взаємодій відповідно до характерних часів розпаду [17, 18] є цілковито хибним. Адже зовсім різні польові конфігурації можуть мати близький час життя, який визначається співвідношенням (64), де фігурує косинус кута θ між векторами $\overrightarrow{k_R}, \overrightarrow{k_I}$. Для стабільних частинок $(\tau \to \infty)$ маємо $\cos\theta = 0$, що відображає ізотропність хвильового вектора $\vec{k}$. Навпаки короткоживучим резонансам відповідають прості хвильові вектори: $\cos\theta \approx \pm 1$. Нестабільний вільний нейтрон, змінюючи свою хронологію в ядрі, характеризується там ізотропним хвильовим вектором та умовно нескінченним часом життя (для стабільних ядер). У цьому контексті введення «квантового числа дивності» [17, 18] для пояснення відносно великого часу життя гіперонів виглядає комічним, власне, як і сучасні теорії фундаментальних взаємодій загалом.

При $\omega \neq 0$ час життя структури поля може бути значно подовжений за рахунок самоіндукції поля і відповідного зростання N_{ch}. В сімействі резонансів це яскраво виражено, наприклад, для $J/\psi-, \psi'-, \Upsilon-$ резонансів, які характеризуються «аномально» вузькою шириною лінії і відповідно «аномально» великим часом життя [17, 18], що не має адекватного пояснення в рамках існуючих концепцій.

Спін та магнітний момент елементарних частинок

Апологети квантової механіки визначають спін електрона суто кінематично, пов'язуючи його з т.з. «дрижанням релятивістського електрона» [17], тобто з електричним зарядом. В дійсності ж спін мікрочастинок та відповідний спіновий магнітний момент напряму пов'язані з сильним та слабким полями. За умови

$$\omega = -\vec{k} \cdot \vec{\mathrm{V}} \tag{117}$$

густина польового кооперативного струму провідності для цих полів становить:

$$\overrightarrow{j_{co}} = i\sigma_{co} \cdot (\vec{\mathrm{V}})^2 \cdot (-\vec{k} + \frac{1}{c}\left[\vec{k} \times \vec{\mathrm{V}}\right]) \tag{118}$$

Відповідно густина спінового моменту має вид:

$$\overrightarrow{m_s} = \left[\vec{r} \times \overrightarrow{j_{co}}\right] = i\sigma_{co} \cdot (\vec{\mathrm{V}})^2 \cdot (-\left[\vec{r} \times \vec{k}\right] + \frac{1}{c}\left[\vec{r} \times \left[\vec{k} \times \vec{\mathrm{V}}\right]\right]), \tag{119}$$

де σ_{co} задається співвідношенням (12). Густина спінового магнітного моменту визначається наступним чином:

$$\vec{m} = \frac{\sqrt{g}}{c} \cdot \overrightarrow{m_s} = \frac{i\sigma_{co} \cdot \sqrt{g} \cdot (\vec{\mathrm{V}})^2}{c} \cdot (-\left[\vec{r} \times \vec{k}\right] + \frac{1}{c}\left[\vec{r} \times \left[\vec{k} \times \vec{\mathrm{V}}\right]\right]) \tag{120}$$

Перші члени в дужках в (119, 120) іменуватимемо «суборбітальними», другі – «субспіновими». Підставляючи у (120) значення $\vec{\mathrm{V}}$ та $(\vec{\mathrm{V}})^2$ для магнітних зарядів протона та нейтрона згідно з (85, 86), отримаємо при $r \geq R_0$:

$$\vec{m}_{p,n} = \pm \frac{\nu_{co}}{2\pi r \mu \sqrt{g}} \cdot \left(c \cdot \left[\vec{e}_r \times \vec{k}\right] - (1 \pm i) \frac{\nu_{co}}{r} \cdot \left[\vec{e}_r \times \left[\vec{k} \times \vec{e}_r\right]\right]\right) \quad (121)$$

де верхні знаки стосуються протона, нижні – нейтрона. Підстановка у (121) фактичних даних показує, що для «аномальних» магнітних моментів протона та нейтрона вклад «суборбітального» магнітного моменту магнітних зарядів у загальний магнітний момент більш ніж у 5 разів перевищує внесок «субспінового» магнітного моменту. У випадку ж електрона (позитрона) все навпаки: «суборбітальні магнітні моменти двох різнойменних магнітних зарядів майже скомпенсовані, в той час як їх «субспінові» магнітні моменти подвоюються. Це, власне, й пояснює «подвоєний магнетизм спіну електрона» [17, 18], розуміння якого недоступне в рамках точкової моделі електрона, взятої за основу в квантовій електродинаміці [17, 18]. Врешті введемо густину спінової та магнітно-спінової спіральностей сильного та слабкого полів відповідно:

$$h_s = \vec{k} \cdot \vec{m}_s = \frac{ic\omega \cdot (\vec{V})^2 \cdot (\vec{k} \cdot \vec{r})}{4\pi\mu g \nu_{co}} \ (122), \quad h_m = \vec{k} \cdot \vec{m} = \frac{i\omega \cdot (\vec{V})^2 \cdot (\vec{k} \cdot \vec{r})}{4\pi\mu \sqrt{g} \nu_{co}} \ (123)$$

Як видно, для стабільних частинок (ω=0) ці густини спіральностейзануляються.

Каскадний транспорт енергії польових форм у мікрокосмічних системах

Знак плюс у виразі (23) для групової швидкості кооперативних хвиль в системах електромагнітного та гравітаційного полів обумовлює прямий енергетичний каскад – в бік малих часових та просторових масштабів. Навпаки, знак мінус у відповідному виразі (46)для сильного і слабкого полів – обернений енергетичний каскад. Накладання цих двох протилежних каскадів формує фрактальний вид енергетичних спектрів, на яких чітко проявлені «два різних схили гори» – мовою давньокитайської філософії [9, 10]. До прикладу, на рис. 2 для порівняння наведені спектр мас подвійних мюонів з найбільшого на сьогодні Великогоадронногоколайдера [4] (рис. 2а) та акустичний спектр процесу різання в технічній системі токарного верстата, який функціонує в динамічно навантаженому режимі бафтингу–флаттеру (рис. 2б). На обох спектрах чітко проявлені обернені енергетичні каскади контактно-наведених кооперативних хвиль. Бафтингові частоти ≈13 Гц та ≈40 Гц на рис. 2б є умовними аналогами J/ψ - та Υ -резонансів на рис. 2а, в той час як флаттерначастота ≈5,6 кГц (рис. 2б) є аналогом Z^0-резонансу (рис. 2а). Другорядний у всіх відношеннях пічок на спектрі мас [4] (навіть не проявлений на рис. 2а правіше Z^0-резонансу), який приписують ілюзорному бозонуХіггса [3–5, 17, 18], тримає на собі всю сучасну стандартну модель фундаментальних взаємодій. Абсурдність такого роду теоретичних побудов випливає вже з того, що умовним аналогом фотона в процесах слабких розпадів виступає нейтрино (антинейтрино), а не $W^{\pm}$-, Z^0-резонанси, прийняті за калібрувальні бозони в існуючих теоріях електрослабкої взаємодії [3–5, 17, 18]. На відміну від систем електромагнітного та гравітаційного полів, густина польового струму $\vec{j}_{co}$ в кооперативно-хвильових режимах сильного і слабкого полів не зануляється. Це унеможливлює пряму конверсію зв'язаних форм цих полів у форми вільних полів, що витікають за межі системи. Отже, випромінювання нейтрино (антинейтрино) в процесах слабких розпадів завжди супроводжується компенсуючим польовим струмом – позитронним (електронним), мюонним, ядра віддачі і т.п.

Прямий каскад в мікрокосмічних системах виразно проявлений в структурі ядерної матерії – рис. 3а. Для порівняння на рис. 3б наведений подібний за виглядом прямий каскад контактно-наведених кооперативних хвиль в технічній системі різання. Характер цих спектрів прямо заперечує необхідність штучно введених у фізиці елементарних частинок ерзац-зарядів (кольору, краси, шарму, дивності і т.п.), які ніби-товиділяють мультиплети, супер-мультиплети, супер-супер-мультиплети і т.д. елементарних частинок [3–5, 17, 18].

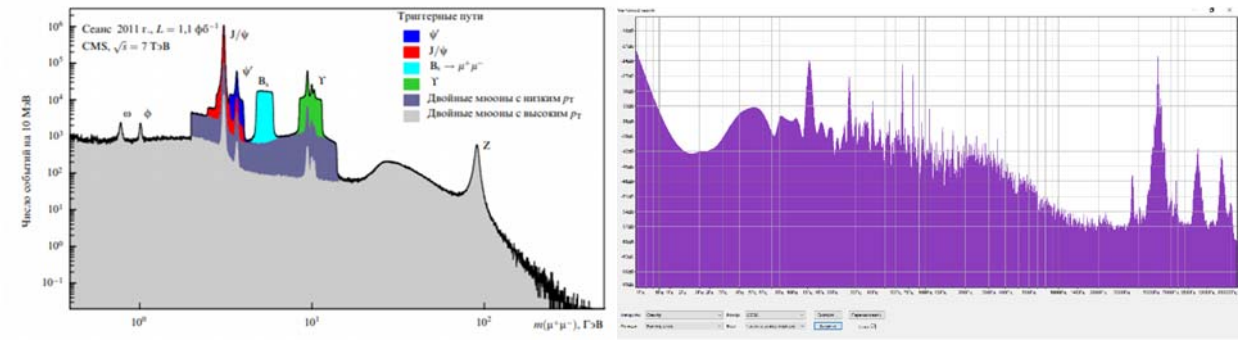


Рис. 2. Спектр мас подвійних мюонів з експериментів на Великому адронномуколайдері [4] (зліва) та акустичний спектр процесу контактної взаємодії в технічній системі різання (справа)

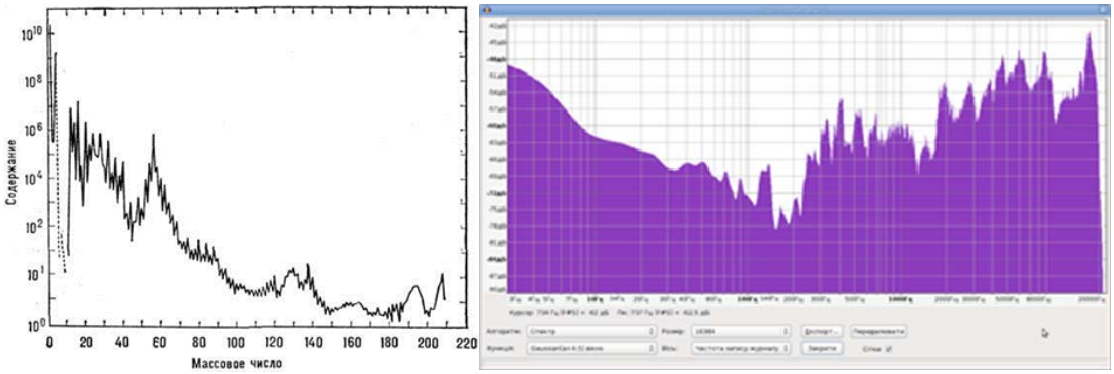


Рис. 3. Масова спектрограма поширеності нуклідів у Сонячній системі [17] (зліва) та акустичний спектр процесу різання в технічній системі (справа)

Енергетичні каскади кооперативних хвиль у макрокосмічних системах

Прямий каскад у макрокосмічних системах електромагнітного та гравітаційного полів безпосередньо проявлений в ієрархічній структурі Всесвіту, відміченій ще Ламбертом та Мельє [9, 10] – у повній протилежності до космологічного принципу Ейнштейна.

Обернені каскади в системах сильного і слабкого полів, а також відповідного їм за топологією гідродинамічного поля швидкостей елементів матеріального середовища, виявляються у різномасштабних магнітних структурах планет та їх супутників, зір, галактик, у спіральних та струменевих структурах галактик, комірчастій структурі метагалактики та ін. Проявами таких каскадів на Землі є практично вся глибинна геодинаміка, плюм- та плейт-тектоніка, сейсмічність, вулканізм та циклічні зміни клімату планети [8].

В Сонячній системі обернений каскад виявляється присутністю відрелаксованих структур на кшталт Головного поясу астероїдів, поясу Койпера, Хмари Оорта [9, 10]. В галактичних масштабах аналогами таких структур є периферійні гало, утворені зі старих зір. В масштабі Метагалактики – периферійне гало, яке знаходиться у тепловій рівновазі з мікрохвильовим фоновим випромінюванням та поступово охолоджується [9, 10].

Поле швидкостей елементів матеріального середовища як у технічних, так і в космічних системах топологічно цілком узгоджене з фундаментальними полями. Щодо сильного та слабкого полів це може бути пояснене мінімізацією першої складової магнітної енергії у (56) та відповідної гідродинамічної енстрофії (квадрату завихореності поля швидкостей) – за умови збереження інтегральної спінової спіральності поля H_sу певних виділених областях D простору:

$$\left|\int_D w_m d\Upsilon\right| \geq c \cdot \left|\int_D h_s d\Upsilon\right| \tag{124}$$

Або ж у скороченій формі запису:

$$\left|W_m\right|_D \geq c \cdot \left|H_s\right|_D \tag{125}$$

Для густини гідродинамічної енстрофії ε та відповідної густини спінової гідродинамічної спіральності h_{sv} матимемо:

$$\varepsilon = \frac{(rot\vec{\mathrm{V}})^2}{2},\ h_{sv} = \frac{i\omega \cdot (\vec{\mathrm{V}})^2 \cdot (\vec{k} \cdot \vec{r})}{\nu_{co}}\ (126, 127),\ \left|\int_D \varepsilon d\Upsilon\right| \geq \left|\int_D h_{sv} d\Upsilon\right| \tag{128}$$

або ж у скороченій формі запису:

$$\left|E\right|_D \geq \left|H_{sv}\right|_D \tag{129}$$

Це тлумачення суттєво відрізняється від топологічних підходів [13, 14, 20], розвинутих в рамках магнітної гідродинаміки та магнітостатики.

Умови (124–129) дійсні як для нестабільних елементарних частинок, так і для нестаціонарних макросистем сильного, слабкого та гідродинамічного полів. В останньому випадку за умови вирівнювання вектор-потенціалів полів $\vec{\mathrm{V}}$ магнітна енергія та гідродинамічна енстрофіявідрізнятимуться лише калібрувальними числовими коефіцієнтами.

В зв'язку з зазначеними аналогіями досить важко відділити макрокосмічні форми сильного та слабкого полів від аналогічних форм гідродинамічного поля швидкостей. До прикладу, на рис. 4б показані гідродинамічні струменеві структури, що походять від молодих зір (об'єктівГербіг-Гаро [21]). Периферійний розпад цих структур обумовлений оберненим каскадом в системі гідродинамічного поля швидкостей. Для порівняння на рис. 4а наведені топологічно подібні струменеві структури сильного та слабкого полів з активного ядра радіогалактики Лебідь-А [22]. Ці структури «не виявляють жодних ознак рухомої матерії» [23], що цілком спантеличує прихильників магнітної гідродинаміки. Однак, периферійний розпад такого роду джетів сильного та слабкого полів в процесі оберненого енергетичного каскаду породжує колосальне за потужністю електромагнітне випромінювання характерного степеневого спектру [9, 10].

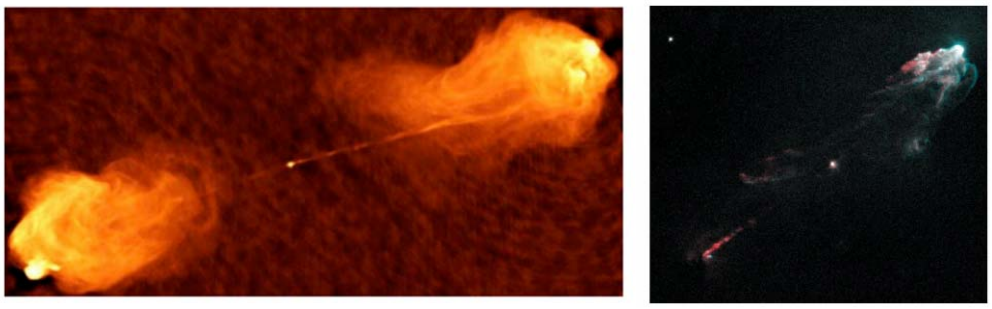


Рис. 4. Струменеві структури радіогалактики Лебідь А [22] (зліва) та об'єкту Гербіг-ГароHH1 [21] (справа)

Мінімізація саме гідродинамічної енстрофії (пропорційної до W_m у (125)), а не кінетичної енергії елементів матеріального середовища, пояснює незалежність дисперсії швидкостей зір у складі галактик від маси зір, а також незалежність дисперсії швидкостей галактик у складі їх скупчень від маси галактик [19].

Поєднання механізмів контактного динамо [8–10] з оберненим енергетичним каскадом в системах сильного, слабкого і гідродинамічного полів врешті вирішує одіозну проблему прихованої маси і темної енергії у Космосі [4–7, 17, 19].

Література

1. Ландау Л.Д. Теория поля / Ландау Л.Д., ЛифшицЕ.М. – М. : Наука, 1988. – 512 с.
2. Паули В. Теорияотносительности / Паули В. – М. : Наука, 1991. – 328 с.
3. The BEH-mechanism, Interactions with Short Range Forces and Scalar Particles. Scientific Background on the Nobel Prize in Physics 2013. URL: http://kva.se
4. Ланев А.В. Результаты коллаборации CMS: бозон Хиггса и поиски новой физики / А.В. Ланев // УФН. – 2014. – Т. 184, № 9. – С. 996–1004.
5. КазаковД.И. Хиггсовский бозон открыт: что дальше? / Д.И. Казаков // УФН. – 2014. – Т. 184, № 9. – С. 1004–1016.
6. Смут Дж.Ф. Анизотропия реліктового излучения: открытие и научное значение: Нобелевсая лекция. Стокгольм, 8 декабря 2006 / Дж.Ф. Смут // УФН. – 2007. – Т. 177, № 12. – С. 1294–1317.
7. Перлмуттер С. Измерение Ускорения космического расширения по сверхновым: Нобелевская лекция. Стокгольм, 8 декабря 2011 / С. Перлмуттер // УФН. – 2013. – Т. 183, № 10. – С. 1060–1077.
8. ЗаспаЮ.П. Кооперативна контактна динаміка хвильових структур в гіперкомплексному спіральному часі та в комплексному Евклідовому просторі як основа геодинаміки та хвильових змін клімату Землі. Фактичний спад глобального потепління та перспектива нового льодовикового періоду / Ю.П. Заспа // Вісник Хмеьницького національного університету. Технічні науки. – 2018. – № 5 (265). – С. 290–301.
9. Заспа Ю.П. Контактне динамо як генератор когерентних космічних форм руху та джерело планетарного, сонячного і галактичного магнетизму. Частина І. / Ю.П. Заспа // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2015. – № 5(299). – С. 106–118.
10. Заспа Ю.П. Контактне динамо як генератор кооперативних космічних форм руху та механізм об'єднання електромагнітного, гравітаційного, сильного і слабкого полів. Частина Х. Порушена антисиметрія, нетривіальна топологія та недетермінована еволюція / Ю.П. Заспа // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2018. – № 2 (259). – С. 302–311.
11. БерестецкийВ.Б. Квантоваяэлектродинамика / БерестецкийВ.Б., ЛифшицЕ.М., ПитаевскийА.П. – М. : Наука, 1989. – 728 с.
12. The Laser Interferometer Gravitational – Wave Observatory and the First Direct Observation of Gravitational Waves. Scientific Background on the Nobel Prize in Physics 2017. URL: http://kva.se
13. Berger M.A. Topological Methods in Astrophysics / M.A. Berger // Phil. Trans. R. Soc. Lond. A. – 2001. – V. 359. – P. 1439–1448.
14. Zhang H. Current Helicity of Active Regions as a Tracer of Large-scale Solar Magnetic Helicity / H. Zhang, D. Moss, N. Kleeorin et.al. // TheAstrophys. J. – 2012. – V. 751, N 47. – P. 1–10.
15. ЗельдовичЯ.Б. Релятивистская астрофизика / Я.Б. Зельдович, И.Д. Новиков // УФН. – 1964. – Т. LXXXIV, вып. 3. – С. 377–417.
16. ДокучаевВ.И. Физическая лаборатория в центре Галактики / В.И. Докучаев, Ю.Н.Ерошенко // УФН. – 2015. – Т. 185, № 8. – С. 829–843.
17. Физическая энциклопедия : в 5 т. / под ред. А.М. Прохорова. – М. : Большаяросс.энц., 1999. – 760 с.
18. Физика микромира. Маленькая энциклопедия / под ред. Д.В. Ширкова. – М. : Сов. энц., 1980. – 528 с.
19. Засов А.В. Темная материя в галактиках / А.В. Засов, А.С. Сабурова,А.В. Хоперсков, С.А. Хоперсков // УФН. – 2017. – Т. 187, № 1. – С. 3–44.
20. Moffat H.K. Helicity in Laminar and Turbulent Flow / H.K. Moffat, A. Tsinober // Annu. Rev. FluidMech. – 1992. – V. 24. – P. 281–312.
21. Reipurth B. Herbig-HaroFlows: Probes of Early Stellar Evolution / B. Reipurth, J. Bally // Annu. Rev.

Astron. Astrophys. – 2001. – V. 39. – P. 403–455.

22. Hardee P. AGNjets: from largest to smallest angularscales / P. Hardee // J. Phys.: Conf. Ser. – 2008. – V. 131, N 012052. – P. 1–13.

23. БескинВ.С. Магнитогидродинамические модели астрофизических струйных выбросов / В.В. Бескин // УФН. – 2010. – Т. 180, № 12. – С. 1241–1278.

References

1. L and auL.D. Teorijapolja / L and auL.D., LifshicE.M. – M. : Nauka, 1988. – 512 s.

2. Pauli V. Teorijaotnositel'nosti / Pauli V. – M. : Nauka, 1991. – 328 s.

3. the BEH-mechanism, in teractions with Short Range Forces and Scalar Particles. Scientific Background on the Nobel Prize in Physics 2013. URL: http://kva.se

4. LanevA.V. Rezul'tatykollaboraciiCMS: bozonHiggsa i poisk in ovojfiziki / A.V. Lanev // UFN. – 2014. – T. 184, № 9. – S. 996–1004.

5. KazakovD.I. Higgsovskijbozonotkryt: chtodal'she? / D.I. Kazakov // UFN. – 2014. – T. 184, № 9. – S. 1004–1016.

6. SmutDzh.F. Anizotropijareliktovogoizluchenija: otkrytie i nauchnoeznachenie: Nobelevsajalekcija. Stokgol'm, 8 dekabrja 2006 / Dzh.F. Smut // UFN. – 2007. – T. 177, № 12. – S. 1294–1317.

7. Perlmutter S. Izmerenie Uskorenija kosmicheskogo rasshirenija posverhnovym: Nobelevskaja lekcija. Stokgol'm, 8 dekabrja 2011 / S. Perlmutter // UFN. – 2013. – T. 183, № 10. – S. 1060–1077.

8. ZaspaYu.P. Kooperatyvnakontaktnadynamikakhvylovykhstruktur v hiperkompleksnom uspiralnomuchasita v kompleksnomu Evklidovomu prostoriyakosnovaheodynamikytakhvylovykhzm in klimatuZemli. Faktychnyispadhlobalnohopotepl in niataperspektyvanovoholodovykovohoperiodu / Yu.P. Zaspa // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2018. – № 5 (265). – S. 290–301.

9. ZaspaYu.P. Kontaktnedynamoyakheneratorkoherentnykhkosmichnykhformrukhutadzhereloplanetarnoho, soniachnoho i halaktychnohomahnetyzmu. Chastyna I. / Yu.P. Zaspa // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2015. – № 5(299). – S. 106–118.

10. ZaspaYu.P. Kontaktnedynamoyakheneratorkooperatyvnykhkosmichnykhformrukhutamekhanizmobiednanniaelektromahnitnoho, hravitatsi in oho, sylnoho i slabkohopoliv. ChastynaKh. Porushenaantysymetriia, netryvialnatopolohiiatanedeterm in ovanaevoliutsiia / Yu.P. Zaspa // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2018. – № 2 (259). – S. 302–311.

11. BeresteckijV.B. Kvantovajajelektrod in amika / BeresteckijV.B., LifshicE.M., PitaevskijA.P. – M. : Nauka, 1989. – 728 s.

12. 12. the Laser in terferometer Gravitational – Wave Observatory and the First Direct Observation of Gravitational Waves. Scientific Background on the Nobel Prize in Physics 2017. URL: http://kva.se

13. Berger M.A. Topological Methods in Astrophysics / M.A. Berger // Phil. Trans. R. Soc. Lond. A. – 2001. – V. 359. – P. 1439–1448.

14. Zhang H. Current Helicity of Active Regions as a Tracer of Large-scale Solar Magnetic Helicity / H. Zhang, D. Moss, N. Kleeor in et.al. // the Astrophys. J. – 2012. – V. 751, N 47. – P. 1–10.

15. Zel'dovichJa.B. Reljativistskajaastr of izika / Ja.B. Zel'dovich, I.D. Novikov // UFN. – 1964. – T. LXXXIV, vyp. 3. – S. 377–417.

16. DokuchaevV.I. Fizicheskajalaboratorija v centreGalaktiki / V.I. Dokuchaev, Ju.N.Eroshenko // UFN. – 2015. – T. 185, № 8. – S. 829–843.

17. Fizicheskajajenciklopedija : v 5 t. / podred. A.M. Prohorova. – M. : Bol'shajaross. jenc., 1999. – 760 s.

18. Fizikamikromira. Malen'kajajenciklopedija / podred. D.V. Shirkova. – M. : Sov. jenc., 1980. – 528 s.

19. ZasovA.V. Temnajamaterija v galaktikah / A.V. Zasov, A.S. Saburova, A.V. Hoperskov, S.A. Hoperskov // UFN. – 2017. – T. 187, № 1. – S. 3–44.

20. M of fat H.K. Helicity in Lam in ar and Turbulent Flow / H.K. M of fat, A. Ts in ober // Annu. Rev. FluidMech. – 1992. – V. 24. – P. 281–312.

21. Reipurth B. Herbig-Har of lows: Probes of Early Stellar Evolution / B. Reipurth, J. Bally // Annu. Rev. Astron. Astrophys. – 2001. – V. 39. – P. 403–455.

22. Hardee P. AGNjets: from largest to smallest angularscales / P. Hardee // J. Phys.: Conf. Ser. – 2008. – V. 131, N 012052. – P. 1–13.

23. Besk in V.S. Magnitogidrod in amicheskiemodeliastr of izicheskihstrujnyhvybrosov / V.V. Besk in // UFN. – 2010. – T. 180, № 12. – S. 1241–1278.

Рецензія/Peer review : 21.01.2019 р. Надрукована/Printed :19.02.2019 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Диха О.В.

За зміст повідомлень редакція відповідальності не несе

Повні вимоги до оформлення рукопису
http://vestnik.ho.com.ua/rules/

Рекомендовано до друку рішенням вченої ради Хмельницького національного університету, протокол № 7 від 31.01.2019 р.

Підп. до друку 18.02.2019 р. Ум.друк.арк. 44,08 Обл.-вид.арк. 42,08
Формат 30х42/4, папір офсетний. Друк різографією.
Наклад 100, зам. № _____

Тиражування здійснено з оригінал-макету, виготовленого
редакцією журналу “Вісник Хмельницького національного університету”
редакційно-видавничим центром Хмельницького національного університету
29016, м. Хмельницький, вул. Інститутська, 7/1. тел (0382) 72-83-63