

ISSN 2307-5732

DOI 10.31891/2307-5732

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

3.2019

ВІСНИК

Хмельницького

національного

університету

Технічні науки

Technical sciences

SCIENTIFIC JOURNAL

HERALD OF KHMELNYTSKYI NATIONAL UNIVERSITY

2019, Issue 3, Volume 273

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, № 3 (273)

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=aUP9OYAAAAJ
Index Copernicus	http://jml2012.indexcopernicus.com/passport.php?id=4538&id_lang=3
РИНЦ	http://elibrary.ru/title_about.asp?id=37650
Polish Scholarly Bibliography	https://pbn.nauka.gov.pl/journals/46221

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

Ч л е н и р е д к о л е г і ї

Технічні науки

Березненко С.М., д.т.н., Бойко Ю.М., д.т.н., Говорушенко Т.О., д.т.н., Гордєєв А.І., д.т.н., Горошко А.В., д.т.н., Грабко В.В., д.т.н., Диха О.В., д.т.н., Захаркевич О.В., д.т.н., Злотенко Б.М., д.т.н., Зубков А.М., д.т.н., Каплун П.В., д.т.н., Каргашов В.М., д.т.н., Кичак В.М., д.т.н., Мазур М.П., д.т.н., Мандзюк І.А., д.т.н., Мартинюк В.В., д.т.н., Мельничук П.П., д.т.н., Місяць В.П., д.т.н., Мясішев О.А., д.т.н., Нелін С.А., д.т.н., Павлов С.В., д.т.н., Параска О.А., к.т.н., Поліщук О.С., д.т.н., Прохорова І.А., д.т.н., Рогатинський Р.М., д.т.н., Сарібекова Д.Г., д.т.н., Семенко А.І., д.т.н., Славінська А.Л., д.т.н., Сорокатиї Р.В., д.т.н., Харжевський В.О., д.т.н., Шинкарук О.М., д.т.н., Шклярський В.І., д.т.н., Щербань Ю.Ю., д.т.н., Ясній П.В., д.т.н.; Бубулис Алгимантас, доктор наук (Литва); Елсаєд Ахмед Ельнашар, доктор наук (Єгипет); Кальчинські Томаш, доктор наук (Польща); Коробко Є.В., д.т.н. (Білорусія); Лунтовський А.О., д.т.н. (Німеччина); Матушевський Мацей, доктор наук (Польща); Мушлевський Лукаш, доктор наук (Польща); Мушля Януш, доктор наук (Польща); Натріашвілі Т.М., д.т.н. (Грузія); Попов В., доктор природничих наук (Німеччина)

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

**Рекомендовано до друку рішенням вченої ради Хмельницького національного університету,
протокол № 11 від 31.05.2019 р.**

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

т	(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

М.С. СТЕЧИШИН, М.В. ЛУК'ЯНИЮК, В.П. ОЛЕКСАНДРЕНКО, М.М. ЛУК'ЯНИЮК РОЗРОБКА І ДОСЛІДЖЕННЯ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНИХ ГАЗОРОЗРЯДНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У ПОДІЛЬСЬКОМУ НАУКОВОМУ ФІЗИКО-ТЕХНОЛОГІЧНОМУ ЦЕНТРІ	6
В.В. КУХАРЧУК, С. М. ЗЛЕПКО, В.Е. КРИВОНОСОВ, Е.Л. ПИРРОТИ ДІАГНОСТИКА ПРЕДАВАРИЙНОГО СОСТОЯННЯ БОЛТОВОГО ТОКОВЕДУЩЕГО СОЄДИНЕННЯ ПРИ СТАЦІОНАРНОМ І НЕ СТАЦІОНАРНОМ РЕЖИМАХ ТОКОВ НАГРУЗКИ ...	13
А.О. СЯСЬКИЙ, Н.В. ШЕВЦОВА, О.Ю. ДЕЙНЕКА МІЖФАЗНИЙ РОЗРІЗ В ІЗОТРОПНИЙ ПЛАСТИНЦІ З КРИВОЛІНІЙНИМ КОНТУРОМ, ПІДСИЛЕНИМ ЗАМКНЕНИМ ПРУЖНИМ РЕБРОМ	18
В.П. СВИДЕРСЬКИЙ, В.С. ЯРЕМЧУК, Г.О. СІРЕНКО СТРУКТУРНО-ТЕХНОЛОГІЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ ЗАСПОКОЮВАЧА І НАТЯЖНОГО БАШМАКА ЛАНЦЮГА ГАЗОРОЗПОДІЛЬНОГО МЕХАНІЗМУ ДВИГУНА ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРАННЯ	24
М.П. СВИТА, Н.М. ЗАЩЕПКІНА РОЗРОБКА ЄМНІСНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ДЛЯ КРИЛЬЧАТИХ ВИМІРЮВАЧІВ ШВИДКОСТІ ТА ВИТРАТОМІРІВ ГАЗІВ	33
В.Д. КОСЕНКОВ, Д.А. ІВЛЕВ, В.В. БУЛГАР, С.М. ОГІНСЬКА, Т.М. МОСПАН КОРЕГУВАННЯ МЕТОДИКИ ПРОЕКТУВАННЯ ГЕНЕРАТОРА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ З БЕЗОБМОТКОВИМ РОТОРОМ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	39
О.А. КАТОК, Р.В. КРАВЧУК ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДИК ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ВИПРОБУВАНЬ ДИСКОВИХ МІКРОЗРАЗКІВ	44
О.А. ДОРОФЄЄВ, В.В. КОВТУН РЕОЛОГІЧНІ МОДЕЛІ СЕРЕДОВИЩА З СУТТЄВИМ ВНУТРІШНІМ ТЕРТЯМ	50
Г.А. БІЛОУС, Т.К. СКРИПНИК, Н.К. МЕДВЕДЧУК РОЗБИТТЯ 3D-ОБ'ЄКТІВ НА ТЕТРАЕДРИ ІЗ ЗАДАНИМ СТУПЕНЕМ ДИСКРЕТНОСТІ	59
О.К. ЯНОВИЦЬКИЙ, Л.Е. БАЙДИЧ МЕТОД ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ГАЛЬВАНІЧНИХ ПОКРИТТІВ НА ДРУКОВАНИХ ПЛАТАХ	63

ТЕХНОЛОГІЇ ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

І.А. МАНДЗЮК, К.О. ПРИСЯЖНА ОПТИМІЗАЦІЯ СКЛАДУ МАСТИЛЬНОЇ КОМПОЗИЦІЇ, РОЗРОБЛЕНОЇ НА ОСНОВІ ЯЛОВИЧОГО ЖИРУ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕХНОЛОГІЇ РЕЦИКЛІНГУ ПОЛІЕТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТУ	66
О.В. ІЩЕНКО, В.П. ПЛАВАН, І.О. ЛЯШОК БІОСУМІСНІ НЕТКАНІ МАТЕРІАЛИ НА ОСНОВІ ХІТОЗАНУ	72
Н.Ю. ГРИБОВА, А.І. МАЛИШЕВСЬКА, О.Ю. КУРСЕНКО, О.І. ХИЖАН, Л.О. КОВШУН ІНТЕРАКТИВНІ МЕТОДИ НАВЧАННЯ ТА РЕВАЛІДАЦІЙНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДИК ВИКОНАННЯ ВИМІРЮВАНЬ КСЕНОБІОТИКІВ	77

РАДІОТЕХНІКА, ЕЛЕКТРОНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

В.А. ДРУЖИНИН, В.І. КОРСУН, К.А. СОКОЛОВ, Ю.М. БОЙКО, О.Ю. БОГОМОЛ МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ МІСЦЕЗНАХОДЖЕННЯ ДЖЕРЕЛ РАДІОЗАВАД В УМОВАХ ПАСИВНОЇ ЛОКАЦІЇ	82
--	----

Г.Г. БОРТНИК, М.В. ВАСИЛЬКІВСЬКИЙ, А.В. КОВАЛЕНКО ЦИФРОВИЙ МЕТОД СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ШИРОКОСМУГОВИХ СИГНАЛІВ	92
О.В. ОСАДЧУК, В.В. МАРТИНЮК, М.В. ЄВСЄЄВА, О.О. СЕЛЕЦЬКА МАГНІТОЧУТЛИВИЙ СЕНСОР НА ОСНОВІ ГЕТЕРОМЕТАЛЕВОЇ КОМПЛЕКСНОЇ СПОЛУКИ	97
А.Д. СЛОБОДЯНИК, Л.Г. КОВАЛЬ, С.М. ЗЛЕПКО, А.Ю. КЛАПОУЩАК ЗАКОНИ ТЕПЛООВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ В СПЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧАХ ..	102
I.YU. ТЕРЛҀАКОВ MODELLING OF THE METAL CORRUGATED-ROD ANTENNA WITH TRANSVERSE RADIATION	109
В.Т. КОНДРАТОВ ФУНДАМЕНТАЛЬНА МЕТРОЛОГІЯ: МАГНІТОПОЛЕВА ТЕОРІЯ ІЗМЕРЕНІЙ С ІСПОЛЬЗОВАННЯМ ЯВЛЕННЯ ПЕРЕНОСА ЕНЕРГІЇ І ІНФОРМАЦІЇ СКВОЗЬ МАТЕРІАЛ ІЛИ ВЕЩЕСТВО. ЧАСТЬ 6. ІЗМЕРЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО УРОВНЯ ФЕРМИ И ЭНЕРГИИ ФЕРМИ ПРИ НОРМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ ПРОВЕДЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ	116
Й.Й. БЛИНСЬКИЙ, О.С. ГОРОДЕЦЬКА, Д.В. НОВИЦЬКИЙ РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ХВИЛЕВОДНОГО НВЧ ВИМІРЮВАЛЬНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ ВОЛОГОСТІ ПРИРОДНОГО ГАЗУ	131
А.А. ВИШЕНСКИЙ О ПОГРЕШНОСТИ КОРРЕЛЯЦИОННОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЙ, ИСПОЛЬЗУЮЩЕГО ПСЕВДОСЛУЧАЙНЫЕ СИГНАЛЫ	137
В.Д. КОСЕНКОВ, Д.А. ІВЛЄВ АНАЛІЗ ШЛЯХІВ ПОСЛАБЛЕННЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ПОПЕРЕЧНОЇ РЕАКЦІЇ ЯКОРЯ В МАШИНАХ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ	142
О.В. БОРОВИК, І.О. САПОЖНИК, Д.О. ЛЕВЧУНЕЦЬ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВИБОРУ МІКРОКОНТРОЛЕРА ЗА КРИТЕРІЄМ МАКСИМІЗАЦІЇ ШВИДКОДІЇ	147
А.В. ЛЯШЕНКО СИСТЕМА АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИНДРОМАЛЬНОЇ ДІАГНОСТИКИ ЗА ЛАПАРОСКОПІЧНИМИ ЗАХВОРЮВАННЯМИ	151
О.М. БЕЗВЕСІЛЬНА, О.В. ПЕТРЕНКО, М.В. ІЛЬЧЕНКО ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ПРИЛАДОВИХ СТАБІЛІЗАТОРІВ	158
В.Ю. ТІТОВА, С.О. САВЧУК, В.Ю. ЧЕРНИШ КОНЦЕПТУАЛЬНА МОДЕЛЬ СИСТЕМИ ЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЇ В СУЧАСНИХ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМАХ	164
О.В. ІВАНОВ, А.Ю. НЕСТЕРЕНКО, В.В. КАЛЮЖНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДІВ АВТОМАТИЗОВАНОГО МОНІТОРИНГУ ПАСИВНИХ ОПТИЧНИХ МЕРЕЖ	168
С.М. ЛИСЕНКО, В.О. ЛІСОВИЙ МЕТОД ТА ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИЯВЛЕННЯ ШКІДЛИВИХ ЗАПИТІВ В КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖАХ НА ОСНОВІ ПРОТОКОЛУ DNS	173
С.М. ЛИСЕНКО, В.А. ТКАЧУК МЕТОД ТА ПРОГРАМНІ ЗАСОБИ ВИЯВЛЕННЯ КІБЕРАТАКИ ТИПУ R.U.D.Y. НА ОСНОВІ ВИКОРИСТАННЯ АЛГОРИТМУ ВИЗНАЧЕННЯ САМОПОДІБНОСТІ ТРАФІКУ	180
О.В. МАЗУРЕЦЬ, О.О. КОВАЛЬ ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ РЕКУРСИВНОГО ПОШУКУ КЛЮЧОВИХ ТЕРМІНІВ У ЦИФРОВИХ ТЕКСТАХ	188

Н.Я. ВОЗНА, І.Р. ПІТУХ ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ ТА МЕТОД МОНИТОРИНГУ СТАНІВ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ МАЛИХ ГІДРОСТАНЦІЙ НА ОСНОВІ ОБРАЗНО-КЛАСТЕРНОЇ МОДЕЛІ	197
Л.І. ФУНДАК, Г.Г. ЦЕГЕЛИК ОПТИМАЛЬНИЙ БЛОКОВИЙ ПОШУК У ВИПАДКУ РІВНОМІРНОГО РОЗПОДІЛУ ЙМОВІРНОСТЕЙ ЗВЕРТАННЯ ДО ЗАПИСІВ	204
О.А. КНЯЗЄВ ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ АДАПТИВНОЇ КОМПЛЕКСНОЇ СИСТЕМИ ФІЛЬТРАЦІЇ КОНТЕНТУ	208
К.Л. ГОРЯЩЕНКО, О.В. ШЕВЧУК ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТЕЛЕКОМУНИКАЦИОННЫХ ЛИНИЙ СВЯЗИ В СТАНДАРТЕ TMN	215
ОБМІН ПРАКТИЧНИМ ДОСВІДОМ, ТЕХНОЛОГІЯМИ ТА ОБГОВОРЕННЯ	
М.Й. БУРБЕЛО, Ю.В. ЛОБОДА, О.В. СТЕПУРА АНАЛІЗ ДИНАМІЧНИХ ПОМИЛОК РОЗПОДІЛЬНИХ СТАТКОМ, ЩО ЗУМОВЛЕНІ НЕТОЧНІСТЮ ФОРМУВАННЯ ЗАДАВАЛЬНИХ СТРУМІВ	220
І.О. КРИВОРУЧКО, С.М. ЗЛЕПКО, Л.Г. КОВАЛЬ, М.І. ПАЛАМАРЧУК ПСИХОЛОГІЧНИЙ І ФІЗІОЛОГІЧНИЙ ПРОФІЛІ ОПЕРАТОРА В КОНТЕКСТІ ОЦІНЮВАННЯ ЙОГО ФУНКЦІОНАЛЬНОГО СТАНУ	226
Д.Ю. ЗУБЕНКО, О.М. ПЕТРЕНКО, В.В. ЛІНЬКОВ МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН	232

DOI 10.31891/2307-5732-2019-273-3-6-12

УДК 669.1:537.5

М.С. СТЕЧИШИН, М.В. ЛУК'ЯНЮК, В.П. ОЛЕКСАНДРЕНКО, М.М. ЛУК'ЯНЮК
Хмельницький національний університет**РОЗРОБКА І ДОСЛІДЖЕННЯ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНИХ
ГАЗОРОЗРЯДНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У ПОДІЛЬСЬКОМУ
НАУКОВОМУ ФІЗИКО-ТЕХНОЛОГІЧНОМУ ЦЕНТРІ**

У роботі досліджено фізико-хімічні та трибологічні характеристики поверхневих азотованих шарів конструкційних сталей після БАТР з автономними енергетичними параметрами (напруга, густина струму, питома потужність електричного розряду). Крім розширення технологічних рамок, застосування БАТР з автономними (незалежними) параметрами дозволяє значно знизити енерговитрати на азотування. Показано також конструктивні зміни в установці для реалізації автономних енергетичних режимів. Встановлено вплив густини струму, напруги на протікання субпроцесів: утворення нітридів, розпорошення поверхні і дифузії азоту. Значення потужності електричного розряду визначає межі існування тліючого розряду, його перехід від тліючого до дугового.

Ключові слова: безводневе азотування в тліючому розряді (БАТР), фізико-хімічні та трибологічні властивості азотованих шарів, автономні (незалежні) енергетичні параметри.

M.S. STECHYSHYN, M.V. LUKIANIUK, V.P. OLEKSANDRENKO, M.M. LUKIANIUK
Khmelnytskyi National University**DEVELOPMENT AND INVESTIGATION OF LOW-TEMPERATURE GAS-RISK TECHNOLOGIES IN THE
PODILSKYI SCIENTIFIC PHYSICAL-TECHNOLOGICAL CENTRE**

The article deals with the emergence and development of scientific activity on the basis of the newly created Khmelnytsky Institute of Consumer Services, the first in Khmelnytsky higher education institution in the city. The creation of the scientific centre under the direction of the assistant professor, now the doctor of technical sciences, professor V.G. Kaplun, has been analysed, on the basis of which Podilsky scientific physics and technology centre (PSPTC) grew. To date, PSPTC has become an all-Ukrainian centre for the creation and development of the latest technologies for the modification of metal surfaces using nitration in the glow discharge, including autonomous power parameters. The physicochemical and tribological characteristics of surface nitrided layers of structural steels after BATR with autonomous energy parameters (voltage, current density, specific power of electric discharge) are investigated in this work. In addition to expanding the technological framework of using BATR with autonomous (independent) parameters, it can significantly reduce energy consumption by nitriding. Also shown are structural changes in the installation for the implementation of autonomous power regimes. The influence of current density, stress on the flow of subprocesses: formation of nitrides, surface dispersion and nitrogen diffusion have been established. The value of the power of the electric discharge determines the limits of the existence of a glow discharge, its transition from the glare to the arc.

Key words: anhydrous nitration in glow discharge (BATR), physico-chemical and tribological properties of nitrided layers, autonomous (independent) energy parameters.

ВСТУП

Відразу після створення Хмельницького технологічного інституту побутового обслуговування (ХТПО) під керівництвом нині д. т. н., проф. Каплуна В. Г. розпочалася наукова робота першого в м. Хмельницький вищого навчального закладу. На основі укладеної угоди з Хмельницьким заводом термопластавтоматів досліджувалася зносостійкість шнеків термопластавтоматів. Для підвищення їх зносостійкості разом з науковцями Московського автомобільно-дорожнього інституту (проф. Лахтін Ю.М.) було вибрано, як показав час, перспективний і універсальний науковий напрямок зміцнення металічних поверхонь деталей безводним азотуванням в тліючому розряді (БАТР). У науковій лабораторії ХТПО вперше в Україні була сконструйована і виготовлена установка для азотування в азото-аргонній суміші У-1. Заміна аміаку на азото-аргонну суміш забезпечила екологічність процесу, значне, порівняно з пічним азотуванням, зниження енергоємності, виключення водневого окрихчення, поліпшення техніки безпеки і умов роботи обслуговуючого персоналу.

Усі наукові і практичні дослідження процесів БАТР проводилися на установках для азотування в тліючому розряді, сконструйованих і виготовлених науковцями і співробітниками нині Подільського наукового фізико-технологічного центру (ПНФТЦ) Хмельницького національного університету (ХНУ).

У процесі проведення досліджень БАТР в конструкцію установок було внесено ряд важливих змін: розроблено за участі доц. Лук'янюка М. В. автоматичну систему газопідготовки, яка включає кисневий очисник, що виключає попадання в камеру кисню і вологи, водневий уловлювач також були розроблені за участі доц. Давидова А. М. мікропроцесори для управління процесами БАТР (блок стабілізації розряду (БСР); стабілізатор процесу азотування (СПА); контролер процесу азотування (КПА); блок контролю і управління газорозрядного деформаційного вакуумметра ВДГ-1; блок імпульсного живлення розряду (БКР)) [1].

На сьогоднішній день розроблено і виготовлено експериментальні зразки семи установок потужністю від 5 до 160 кВт, з числом камер від 1 до 3, для яких створено банк оптимальних технологічних

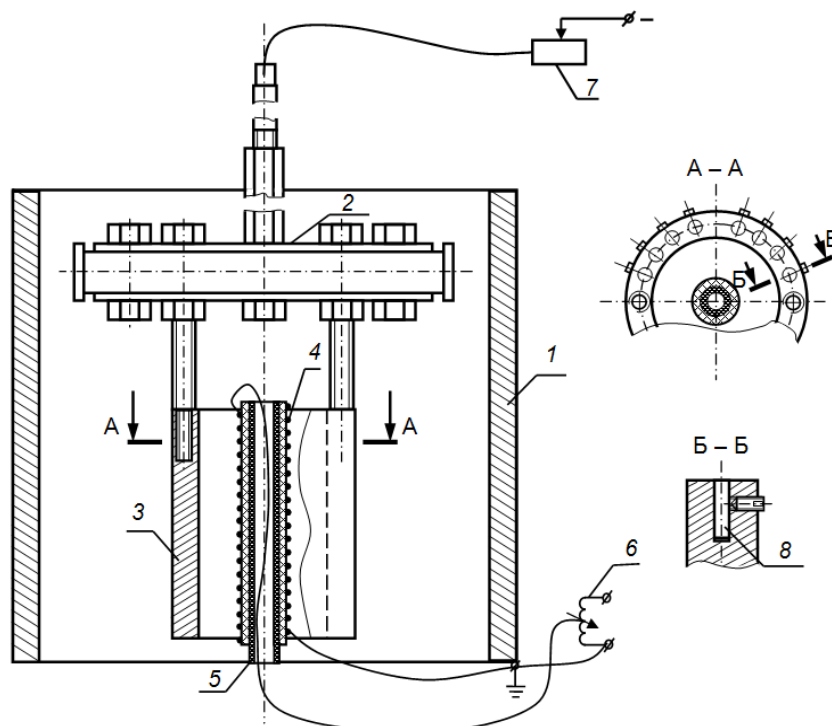
режимів БАТР, залежно від виду матеріалу деталі, вимог її експлуатації, форми і розмірів [1, 2].

Подальші дослідження проводились на основі енергетичної теорії БАТР, розробленої проф. Пастухом І. М. з автономними (незалежними) енергетичними режимами [2].

Безводневе азотування в тліючому розряді з незалежними параметрами відкриває принципово нові можливості як теоретичного, так і технологічного планів. Перш за все, це стосується покращення керованості модифікаційним процесом, його оптимізації у відповідності до вимог подальшої експлуатації модифікованих деталей. Не зважаючи на очевидні нові можливості, які відкриває застосування даного процесу, він практично не досліджувався ні в теоретичному, ні в експериментальному планах, що не сприяє повному використанню всіх його потенційних можливостей. Теоретичні дослідження виконані на основі розробленої енергетичної моделі процесу, котра у значній мірі більш адекватно пояснює всі субпроцеси, які є складовими загального модифікаційного процесу. Комбінування енергетичних параметрів БАТР як у часі, так і за співвідношенням відкриває нові можливості керованого формування фазової структури поверхневого модифікованого шару відповідно до вимог експлуатації.

З точки зору екології процес абсолютно чистий і порівняно з іншими варіантами, включаючи традиційне азотування в тліючому розряді з взаємозалежними параметрами – енергетично більш вигідний, оскільки відкриває можливість оптимізації технології, в тому числі з метою скорочення енергетичних затрат, що, в свою чергу, позитивно впливає на економіку виробництва.

Методика проведення досліджень. Для реалізації процесу БАТР і забезпечення незалежності енергетичних параметрів режиму була модернізована установка азотування в тліючому розряді У-1. В принципі апаратна реалізація вказаної задачі може досягатись по-різному. Як варіант було запропоновано конструктивне рішення, яке представлено на рис. 1.



1 – корпус розрядної камери; 2 – підвіска; 3 – корпус оснастки; 4 – спіральний нагрівач; 5 – керамічна трубка; 6 – автотрансформатор; 7 – реостат баластний; 8 – зразки

Рис. 1. Ескіз оснастки для реалізації процесу азотування в тліючому розряді з автономними (незалежними) параметрами режиму

Корпус розрядної камери 1 слугує анодом, всередині якого розміщена підвіска 2, яка являється катодом, до неї під'єднаний корпус оснастки 3, у якому встановлюються зразки 8 з різних сталей. З внутрішньої сторони корпус оснастки нагрівається спіральним нагрівачем 4 на керамічному каркасі з виводом одного з кінців ніхромової спіралі через центральну керамічну трубку 5. Температура нагріву деталей (зразків) регулюється за допомогою автотрансформатора 6. Баластний реостат 7 застосовується для зміни співвідношень між струмом і напругою.

Контроль температури здійснювався за допомогою пірометра моделі АПРС-М. Вимірювальна система пірометра тарована в умовах, аналогічних реальному тліючому розряду.

Вимірювання товщини нітридної зони здійснювалися за допомогою модернізованого металографічного мікроскопа МІМ-10, що дозволило здійснювати візуальне спостереження та фотографування мікроструктури зразків, а також кількісний аналіз фазового та структурного складу сталей за допомогою напівавтоматичного вбудованого пристрою. Товщина нітридної зони модифікованого шару

розраховувалась як середнє арифметичне значеннь вимірювань, проведених у 50 точках досліджуваного зразка. Загальна товщина азотованого шару визначалась відповідно до ГОСТ 20495–75.

Мікротвердість вимірювалась на приладі ПМТ-3 при навантаженні 0,98 Н (0,1 кг) з фіксацією значень мікротвердості як на поверхні, так і на певній відстані від неї вглиб зразка, а саме: 0, 25, 50, 100, 200, 300, 500 мкм.

Рентгено-фазовий аналіз проводився на дифрактометрі рентгенівському загального призначення ДРОН-3 у фільтрованому випромінюванні залізного анода, в діапазоні кутів 2θ від 20° до 100° з кроком сканування $0,1^\circ$ і часом експозиції 10 с. Рентгенозйомка виконувалась від плоских торців циліндричних зразків, підданих азотуванню в глибину модифікованого шару.

З метою оптимізації кількості експериментів до мінімально необхідної з точки зору досягнення поставленої мети дослідження доцільно було провести дев'ять технологічних процесів. Оскільки вплив на експлуатаційні характеристики азотованих сталей складу газової суміші, температури та тривалості процесу азотування в тліючому розряді (АТР) уже неодноразово досліджувався [1], ці параметри прийняті постійними і призначені, виходячи з типових технологічних режимів БАТР, наведених у [2], що були складені на основі багаторічного досвіду, отриманого при проведенні експериментальних і виробничих робіт, а саме: температура $T = 560^\circ\text{C}$, тривалість процесу $\tau = 4$ год, склад газової суміші – 80% N_2 +20% Ar . Напруга та сила струму обирались дослідним шляхом при проведенні попередніх експериментів. Густина струму визначалась як відношення сили струму до загальної площі поверхні катоду. Значення тиску, напруги та густини струму наведені у таблиці 1. При цьому досліди 1, 4, 7 були проведені з залежними параметрами, тобто без застосування додаткового джерела підігріву деталей (зразків).

Таблиця 1

Технологічні параметри режимів азотування у тліючому розряді

Режим	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Тиск p , Торр (Па)	0,4 (53,2)			0,8 (106,4)			1,2 (159,6)		
Напруга U , В	1100	820	515	840	515	300	700	515	300
Густина струму j , A/m^2	11	7,2	3,2	13,2	7,2	2,8	15,8	12,8	7,2

Досліди другої серії експериментів були проведені за тих самих режимних параметрів, що й досліди 1, 4, 7 першої серії, але із застосуванням підвіски іншої форми та розмірів, що спричинило зміну значень напруги та густини струму: $U_{11} = 680$ В; $j_{11} = 15,3$ A/m^2 ; $U_{12} = 610$ В; $j_{12} = 16,4$ A/m^2 ; $U_{13} = 540$ В; $j_{13} = 17,2$ A/m^2 .

Експериментальні дослідження зразків на зносостійкість проводились на універсальній машині для випробування матеріалів на тертя моделі 2168УМТ за відпрацьованою в попередніх дослідженнях методикою при наступних параметрах процесу:

- тиск в зоні тертя – 16 МПа;
- швидкість взаємного переміщення зразка відносно контртіла – $v = 0,1$ м/с;
- в якості контртіла використовувалось кільце упорного підшипника виготовлене із сталі ШХ15;
- кількість одночасно досліджуваних зразків – 3, рівномірно розміщених по периметру кільця контртіла через 120 градусів, що сприяло рівномірному їх зношуванню.
- Заміри величини зношення зразків здійснювалися за спеціальною схемою:
- від 0 до 50 метрів – через 5 м;
- від 50 до 100 метрів – через 10 м;
- від 100 до 250 – через 25 м;
- 250 і далі – через 50 м.

Такий підхід забезпечує більш детальне дослідження процесу зношування азотованих зразків, особливо на початковому етапі, коли стирається нітридний шар, а також перші шари зони внутрішнього азотування.

Результати досліджень та їх обговорення. Одним із очікуваних результатів досліджень було встановлення характеру розподілу мікротвердості по глибині модифікованого азотуванням в тліючому розряді шару конструкційних сталей.

Результати дослідження розподілу мікротвердості по глибині модифікованого шару на зразках із різних сталей наведено в таблиці 2.

Аналіз експериментальних даних свідчить, що зменшення значень напруги і густини струму призводить до зниження поверхневої мікротвердості сталей. Що ж стосується розподілу мікротвердості по глибині модифікованого шару, то при незначних відмінностях у градієнті її зміни абсолютні значення мікротвердості зразків, азотованих при вищих енергетичних показниках є вищими по всій глибині шару (табл. 2).

Збільшення вмісту легуючих елементів (у тому числі азотоактивних – насамперед, хрому) призводить до того, що характер вказаної залежності стає більш яскраво вираженим, що можна пояснити зростанням продуктивності процесу утворення нітридів, які, як відомо, здійснюють гальмівний вплив на дифузію азоту вглиб матеріалу і тим самим перешкоджають утворенню азотованих шарів.

Таблиця 2

Розподіл мікротвердості по глибині модифікованого шару сталей, азотованих в тліючому розряді

Номер режиму	Відстань від поверхні, мкм							
	0	25	50	100	200	300	500	1000
Сталь 45								
1	563	343	321	316	298	299	275	220
2	509	333	315	310	294	277	249	209
3	269	295	286	281	279	261	234	212
4	523	335	328	312	306	291	269	206
5	442	306	306	300	304	292	263	212
6	383	296	306	283	285	268	237	204
7	594	364	354	324	297	273	261	221
8	506	321	310	298	262	261	221	220
9	239	211	204	210	202	198	201	203
Сталь 40X								
1	796	533	481	450	366	313	273	274
2	676	524	480	421	310	263	251	252
3	412	427	365	289	253	266	256	257
4	647	469	448	439	344	306	269	258
5	444	367	383	360	295	264	255	250
6	230	227	257	254	255	256	253	250
7	842	492	464	446	360	296	249	243
8	625	447	447	407	345	284	249	254
9	238	255	233	236	243	239	240	240
Сталь 38X2МЮА								
1	1058	958	852	561	298	255	249	249
2	1041	911	822	756	347	239	241	225
3	282	320	295	281	228	235	237	240
4	1019	698	657	618	443	256	230	219
5	360	260	264	250	232	232	230	232
6	331	236	220	232	232	231	230	232
7	1098	942	816	638	347	262	240	234
8	641	746	764	560	236	217	210	210
9	263	229	248	240	237	232	235	218

Прийнявши твердість у якості базового параметра з метою оцінки товщини азотованого шару (ГОСТ 20495–75), можна зробити висновок, що для неї зберігається та сама тенденція – зі зниженням енергетичних параметрів процесу БАТР товщина азотованого шару зменшується.

Ця закономірність характерна і для товщини нітридної зони (табл. 3).

Таблиця 3

Товщина модифікованого шару та нітридної зони сталей, азотованих в тліючому розряді

Режим	Товщина модифікованого шару, мм			Товщина нітридної зони, мкм		
	Сталь 45	40X	38X2МЮА	Сталь 45	40X	38X2МЮА
1	0,45	0,40	0,20	3,44	5,88	7,86
2	0,40	0,30	0,15	3,33	2,42	6,27
3	0,30	0,075	0,05	0	0	0
4	0,45	0,30	0,20	3,75	3,64	8,00
5	0,35	0,20	0,01	1,73	3,20	3,20
6	0,30	0	0,01	0	0	0
7	0,50	0,30	0,25	5,33	8,76	7,13
8	0,30	0,25	0,15	3,46	6,60	5,96
9	0	0	0	0	0	0

Дані рентгеноструктурного аналізу також свідчать про те, що структура та фазовий склад азотованих сталей теж залежать від енергетичних параметрів розряду.

Відомо, що при АТР одночасно відбуваються основні конкуруючі, взаємодоповнюючі і взаємозаперечувальні субпроцеси [2]: утворення нітридів, дифузійне насичення поверхневого шару азотом і розпорошення поверхні. Енергетичні умови перебігу головних субпроцесів суттєво відрізняються. Так, утворення нітридів відбувається при низьких енергіях, процес розпорошення поверхні навпаки активізується при високих значеннях напруги. І саме співвідношенням інтенсивностей перебігу основних

субпроцесів визначаються структура та фазовий склад модифікованих шарів. Залежно від поточної комбінації параметрів режиму формування модифікованого шару може відбуватися за різними напрямками, причому в кожній конкретній ситуації інтенсивність перебігу вказаних субпроцесів, а отже й інтенсивність утворення тієї чи іншої фази, може бути різною не лише за величиною, але й за знаком, оскільки попередньо створена фаза може знаходитись під впливом деструктивних явищ.

Наприклад, при підвищенні енергії падаючого потоку попередньо утворений прошарок нітридів розпоршується, а це у свою чергу стимулює процес дифузії азоту вглиб поверхні. Якщо ж енергія потоку часток виявляється недостатньою для розпоршення утворюваного нітридного шару, останній виступає у ролі своєрідного бар'єру, що унеможлиблює процес дифузії. Останній факт пояснює неприйнятно низькі показники модифікованих поверхонь, отриманих при проведенні експериментів за режимами 3, 6, 9.

Згідно з результатами рентгеноструктурного аналізу при максимальних значеннях енергетичних параметрів формується азотований шар, що містить ϵ -, γ' - і α -фази. Зниження напруги і густини розрядного струму призводить до збільшення частки γ' -фази (Fe_4N) у нітридній зоні модифікованого шару і відповідно – до зменшення частки ϵ -фази (Fe_2N). При мінімальних значеннях енергетичних параметрів утворення нітридів на поверхні не спостерігалось, азотований шар містив тільки α -фазу.

Відомо, що товщина і фазовий склад нітридної зони визначають її властивості, а отже, в кінцевому підсумку, і властивості модифікованої сталеві поверхні. Так, нітридна зона, що містить лише γ' -фазу, характеризується достатньо високою пластичністю, зона ж, що містить ϵ -фазу, має меншу пластичність, але вищу корозійну стійкість. Найвища пластичність відповідає шару без нітридної зони. В цілому, чим тоншою є нітридна зона, тим більш пластичним є азотований шар, але тим нижчий опір абразивному зношуванню, особливо в умовах сухого тертя [3].

Таким чином, для деталей, що працюють у корозійному середовищі та на зношування при малих контактних навантаженнях процес БАТР повинен проводитись при максимально можливих значеннях напруги та густини струму, що забезпечить утворення ϵ -фази і, відповідно, високий опір корозії та припрацювання поверхонь тертя. Зниження значень енергетичних параметрів при проведенні БАТР призведе до збільшення частки γ' -фази, а отже, може бути рекомендоване для деталей, що працюють при високих динамічних навантаженнях в умовах зношування при високому тиску; корозійна стійкість при цьому буде знижена [4].

Залежність зносостійкості модифікованих поверхонь від енергетичних параметрів розряду було підтверджено при проведенні трибологічних досліджень. У результаті експериментів було виявлено, що в умовах сухого тертя для поверхонь, модифікованих при вищих енергетичних показниках, інтенсивність зношування і період припрацювання (рис. 2) зменшуються, а період сталого зношування збільшується, причому, зі збільшенням вмісту легованих елементів у сталі ця закономірність стає більш яскраво вираженою. Зрозуміло, що за інших умов проведення експериментів залежність трибологічних властивостей азотованих поверхонь від густини струму та напруги на електродах камери може набувати іншого характеру, але сам по собі факт існування такої залежності сумнівів не викликає, що спростовує наведені у роботі [5] положення, згідно з якими енергетичні характеристики розряду не здійснюють суттєвого впливу на результати БАТР.

Наведені дані дозволяють зробити цілком очевидний висновок щодо впливу напруги та густини струму на характеристики модифікованого шару, що є визначальними для зносостійкості азотованих у тліючому розряді сталей – він є не просто суттєвим, а вирішальним. Більше того – в області енергетичних параметрів режиму існує деяка межа, нижче якої проведення процесу АТР взагалі втрачає сенс, оскільки призводить до отримання неприйнятних результатів, і це попри те, що значення режимних залишаються постійними.

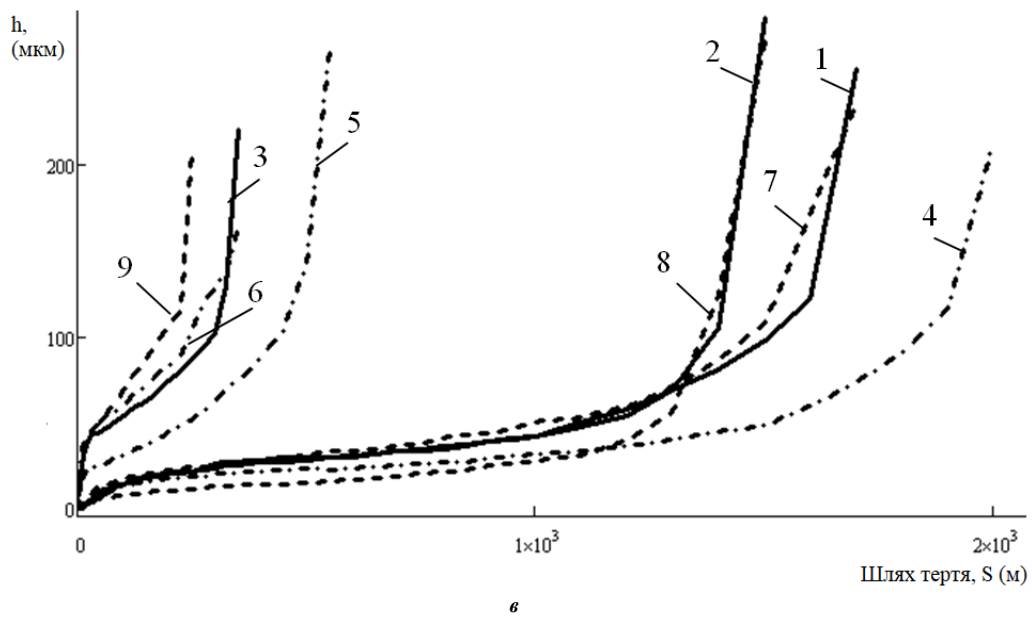
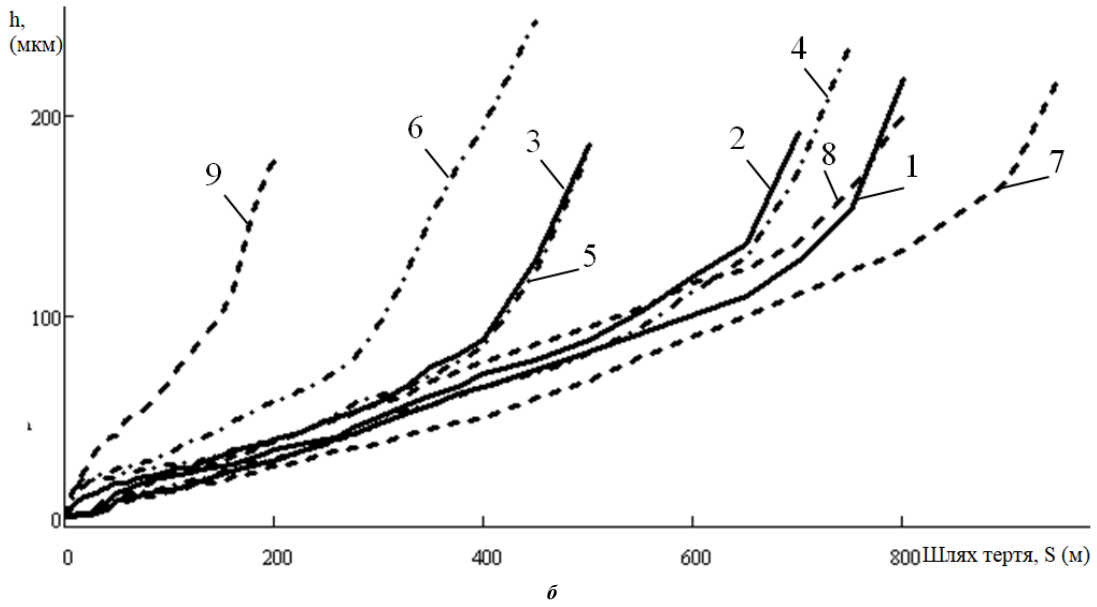
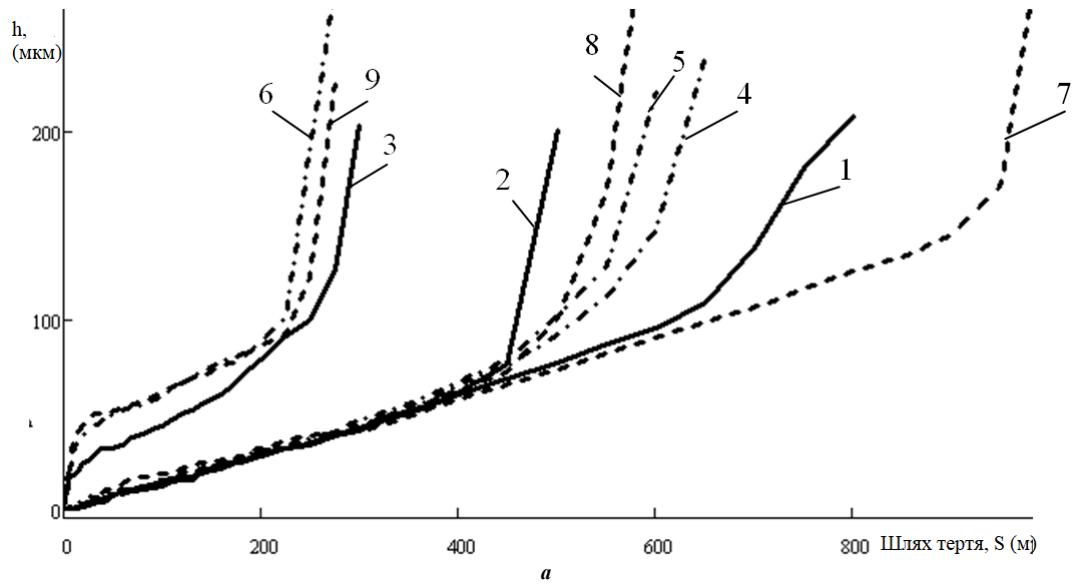
Це зокрема означає, що комплекс традиційно фіксованих режимних параметрів (температура, тиск, склад газової суміші та тривалість процесу) не дає однозначного уявлення про умови проведення процесу БАТР, а отже не може слугувати основою для прогнозування його результатів.

Цей факт знаходив своє неодноразове підтвердження, коли технологічні процеси, проведені за аналогічних значень режимних параметрів, але в різних установках (або навіть в одній установці, але з використанням іншої підвіски), призводили до абсолютно різних результатів.

Це пояснюється тим, що факторами, які визначають результативність процесу азотування у тліючому розряді, виступають не лише параметри режиму, але й такі показники, як міжкатодна відстань, форма та розміри підвіски і досліджуваного зразка (або деталі), наявність локальних виключень на його поверхні, концентраторів напруги і багато інших.

Перелік факторів, які є визначальними при азотуванні в тліючому розряді, наведений американським дослідником Девідом Пайєм (DavidPye) у роботі [6], включає тринадцять найменувань.

Зрозуміло, безпосереднє врахування усіх цих показників призвело б до неймовірного ускладнення керування процесом АТР. Проте, їх можна враховувати опосередковано, оскільки вплив усіх перерахованих факторів відображають енергетичні параметри процесу.



a – сталь 45; *б* – сталь 40X; *в* – сталь 38X2MЮА

Рис. 2. Криві зношування сталей, азотованих в тліючому розряді

На підтвердження цієї тези була проведена додаткова серія експериментів. Як уже зазначалося, зразки азотувалися у тій самій установці і при тих самих режимних параметрах, що й у дослідах 1, 4, 7 основної серії, але при цьому була використана підвіска іншої форми та розмірів, що спричинило зміну значень напруги та густини струму і суттєву відмінність між характеристиками відповідних азотованих шарів, отриманих в результаті проведення двох серій експериментів. Останнє ще раз підтверджує той факт, що результативність процесу БАТР значною мірою визначається енергетичними характеристиками розряду.

ВИСНОВКИ

1. Запропоновано ефективний спосіб апаратної реалізації процесу БАТР з незалежними параметрами, що полягає у модернізації обладнання, призначеного для поверхневої модифікації поверхонь деталей, інструменту та оснащення за допомогою вакуумно-дифузійних газорозрядних технологій. Суттєвими перевагами запропонованого способу є простота реалізації, економічність і енергоефективність, що було підтверджено експериментальним шляхом;

2. Експериментально підтверджена залежність між результатами модифікації та енергетичними характеристиками розряду відкриває додаткові можливості в управлінні процесом БАТР, але це потребує розробки нових методів проектування технологічних процесів вказаного типу.

Література

1. Каплун В.Г. Ионное азотирование в безводородных средах : монография / В.Г. Каплун, П.В. Каплун. – Хмельницкий : ХНУ, 2015. – 315 с.
2. Пастух И.М. Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде : монография / И.М. Пастух. – Харьков : ННЦ ХФТИ, 2006. – 164 с.
3. Скиба М.С. Дослідження процесів безводневого азотування в тліючому розряді / М.С. Скиба, М.С. Стечишин, В.П. Олександренко, В.С. Курської, А.В. Мартинюк // Проблеми трибології. – Хмельницький. – 2018. – № 2. – С. 6–16.
4. M. S. Stechyshyn, N. M. Stechyshyna, V. S. Kurskoi. Corrosion and Electrochemical Characteristics of the Metal Surfaces (Nitrided in Glow Discharge) in Model Acid Media March 2018, Volume 53, Issue 5, pp 724–731.
5. Keller K. Schichtaufbau glimmitrierten Eisenwerkstoffe / K. Keller // Harterei-Technische Mitteilung. – 1971. – Bd. 26, № 2. – S. 120–128.
6. Pye D. Practical Nitriding and FerriticNitrocarburizing / D. Pye. – Ohio – ASM International, 2003. – 260 p.

References

1. Kaplun V.G. Ionnoe azotirovanie v bezvodnorodnyh sredah : monografiya / V.G. Kaplun, P.V. Kaplun. – Hmelnickij : HNU, 2015. – 315 s.
2. Pastuh I.M. Teoriya i praktika bezvodnorodnogo azotirovaniya v tleyushem razryade : monografiya / I.M. Pastuh. – Harkov : NNC HFIT, 2006. – 164 s.
3. Skyba M.Ie. Doslidzhennia protsesiv bezvodnevoho azotuvannia v tliiuchomu rozriadi / M.Ie. Skyba, M.S. Stechyshyn, V.P. Oleksandrenko, V.S. Kurskoi, A.V. Martyniuk // Problemy trybolohii. – Khmelnytskyi. – 2018. – № 2. – S. 6–16.
4. M. S. Stechyshyn, N. M. Stechyshyna, V. S. Kurskoi. Corrosion and Electrochemical Characteristics of the Metal Surfaces (Nitrided in Glow Discharge) in Model Acid Media March 2018, Volume 53, Issue 5, pp 724–731.
5. Keller K. Schichtaufbau glimmitrierten Eisenwerkstoffe / K. Keller // Harterei-Technische Mitteilung. – 1971. – Bd. 26, № 2. – S. 120–128.
6. Pye D. Practical Nitriding and FerriticNitrocarburizing / D. Pye. – Ohio – ASM International, 2003. – 260 p.

Рецензія/Peer review : 6.4.2019 р. Надрукована/Printed : 1.6.2019 р.
Прорецензовано редакційною колегією

В.В. КУХАРЧУК, С. М. ЗЛЕПКО
Винницкий национальный технический университет
В.Е. КРИВОНОСОВ
Приазовский государственный технический университет
Е.Л. ПИРРОТИ
Харьковский политехнический институт

ДИАГНОСТИКА ПРЕДАВАРИЙНОГО СОСТОЯНИЯ БОЛТОВОГО ТОКОВЕДУЩЕГО СОЕДИНЕНИЯ ПРИ СТАЦИОНАРНОМ И НЕ СТАЦИОНАРНОМ РЕЖИМАХ ТОКОВ НАГРУЗКИ

Основная проблема контактного соединения – это ослабление плотности болтового соединения и увеличение переходного сопротивления контакта, в результате чего, согласно закону Джоуля-Ленца, возникает перегрев соединения с последующим развитием аварии и отключением электрооборудования. Существующие методы неразрушающего контроля целостного соединения не позволяют определить начальный момент ослабления токоведущего соединения. Разработанные математические модели позволили сформулировать условия выявления начального момента образования аварийного режима для различных режимов токовой нагрузки.

Ключевые слова: ослабление болтового соединения, стационарный, нестационарный и случайный режимы токовой нагрузки, неразрушающий контроль, начальный момент ослабления контакта.

V. V. KUKHARCHUK, S.M. ZLEPKO
Vinnytsia National Technical University
V.E. KRIVONOSOV
Priazovsky State Technical University
E. L. PIRROTI
Kharkov Polytechnic Institute

MATHEMATICAL MODELS OF NON-DESTRUCTIVE METHODS FOR DIAGNOSING BOLTED CONNECTIONS

The main problem of a bolted current-conducting connection is the mechanical weakening of the contact density of the adjacent surfaces of busbars, cable lugs, switching equipment connections, etc., which causes an increase in contact resistance of the contact, as a result of which the load current flows through it Joule-Lenz law, there is overheating of the connection. Development of methods for non-destructive testing of diagnostics of the state of a bolted current-conducting connection, which allow timely detection of a pre-emergency situation regardless of the magnitudes and mode of the current load and the ambient temperature. The solution of the task is relevant, in connection with the transition of enterprises from the system of planned preventive repairs to repairs according to the actual state of the object. The nature of the change in current load is due to the technological mode of operation of the equipment, and the stationary and deterministic nature of the change in current is a special case of a non-stationary mode. Changes in the magnitude of the current discretely, monotonously decreasing or increasing will lead to the appearance of a transient process of heating and cooling the bolted current-carrying connection, at which the temperature of the bolted current-carrying connection will vary in a decreasing or increasing exponential relationship. The change in ambient temperature also monotonously increases or decreases. In the modes of non-stationarity of the current load, it is important to identify areas of stationarity. The diagnostics of the emergency mode of current-carrying attenuation describe the estimated Boolean functions that take into account changes in load current and ambient temperature. For non-stationary current modes, detecting the initial moment of a contact current-carrying bolted connection is possible only in the area of simultaneous stationarity of monitored values. The timely detection of the initial moment of loosening of the bolt-conducting connection allows you to move from the CPD system to the electrical equipment maintenance system upon the detection of a defect.

Keywords: relaxation of bolted connection, stationary, non-stationary and random modes of current load, non-destructive testing, initial moment of contact attenuation

Анализ последних исследований и публикаций

Основная проблема болтового токоведущего соединения (БТС) – это механическое ослабление плотности контактов прилегающих поверхностей токоведущих шин, кабельных наконечников, присоединений коммутационной аппаратуры и т.д., что является причиной увеличения переходного сопротивления контакта, в результате чего, при протекании в нем тока нагрузки, согласно закону Джоуля-Ленца, возникает перегрев соединения с последующим развитием аварии и аварийным отключением электрооборудования (ЭО) [1, 2].

На появление градиента температур в месте соединения оказывают влияния изменения климатических параметров, в диапазоне от -25°C до 50°C и динамически изменяющие режимы эксплуатационных токовых нагрузок. Динамическое изменение токов в пределах $(0,1-1,1) I_n$, где I_n – номинальный ток нагрузки; пусковые токи до $(5-7) I_n$ и постоянно действующая электродинамическая сила с частотой 100 Гц, возникающие при протекании тока в соседних проводах, являются причиной ослабления БТС [3].

Проведенные исследования причин остановки (ЭО) на ряде предприятий черной металлургии, горно-перерабатывающих комплексов, в медицинских учреждениях показал, что 1,5-2% причиной аварийной остановки ЭО является ослабление БТС [2, 4].

Широко используемый тепловой метод неразрушающего контроля температуры БТС позволяет выявлять аварийные состояния БТС, не нарушая технологического процесса.

Известные методы и устройства диагностики состояния БТС такие, как установка плавких меток с легкоплавким припоем (сплавом Розе), контактное измерение температуры, тепловизионный контроль, использование светочувствительных наклеиваемых индикаторов, установка биметаллических пластин под гайку БТС и др., реагируют на последствия ослабленного болтового соединения, то есть при достижении температуры БТС установленной критической величины. Контроль критического значения температуры БТС не позволяет диагностировать предаварийную ситуацию ослабления БТС, то есть начальный момент ослабления БТС [1, 3, 7].

Процесс механического ослабления БТС, при отсутствии внешних климатических, вибрационных факторов и при стационарном характере токовой нагрузки, не превышающей $0,5 I_n$, протекает от нескольких суток до нескольких месяцев.

Возрастание тока нагрузки от минимальной величины до номинального значения, особенно в сочетании с ростом температуры окружающего воздуха, приводит к нагреву ослабленного БТС выше критической температуры за время, равное нескольким постоянным нагрева БТС от 0,5 часа до 1 часа и, как правило, является причиной двух-, трехфазного короткого замыкания, выгорания распределительного щита и создания пожарной ситуации [7].

Цель работы

Разработка методов неразрушающего контроля диагностики состояния БТС позволяющих своевременно выявить предаварийную ситуацию независимо от величин и режима токовой нагрузки и температуры окружающего воздуха. Решение поставленной задачи является актуальной, в связи с переходом предприятий от системы планово предупредительных ремонтов к ремонту по фактическому состоянию объекта.

Изложение основного материала

Процесс нагрева БТС, вызванного потерями в болтовом соединении токами нагрузки, с достаточной для практических целей точностью, описывает дифференциальное уравнение нагрева однородного тела [10]:

$$\Delta P dt = \alpha F \Delta T dt + c G dT, \tag{1}$$

где $\Delta P = I_{нагр}^2 R_c$ – потери мощности, выделяемые в болтовом соединении, при протекании тока $I_{нагр}$ и имеющего R_c – суммарное сопротивление болтового соединения и переходного сопротивления контакта $R_c = R_{бс} + R_{пр}$,

dt – время протекания переходного процесса;

α – коэффициент теплопередачи;

F – площадь поверхности болтового соединения;

c – удельная теплоёмкость материала, из которого выполнено болтовое соединение;

G – масса болтового соединения

Решением уравнения (1) известно [10]:

$$T_{бз} = T_{убз} - (T_{убз} - T_{нач}) e^{-t / \tau}, \tag{2}$$

где $T_{бз}$ – температуры БТС;

$T_{убз}$ – температура БТС в установившийся режим;

τ – постоянная нагрева БТС;

$T_{нач}$ – начальная температура БТС, которая вызвана за счет нагрева первоначальными потерями и температурой окружающего воздуха.

Температура БТС в установившемся режиме, с учетом приращения температуры окружающей среды, где за нулевое значение температуры окружающей среды принято значение равное $24^\circ C$, и при отсутствии нагрева первоначальными потерями предыдущего токового режима, определяется выражением:

$$T_{убз} = \left(\frac{I_{нагр}^2}{\alpha F} (R_{бс} + R_{пр}) + 24^\circ C \right) + (T_{нач} - 24^\circ C) \tag{3}$$

Выражение (3) показывает функциональную зависимость температуры БТС от тока нагрузки, температуры окружающего воздуха, величины переходного сопротивления и температуры, вызванной первоначальным нагревом:

$$T_{убз} = f(I_{нагр}^2, (R_{бс} + R_{пр}), (T_{нач}), (T_{нач} - 24^\circ C)), \tag{4}$$

Функциональная структура метода позволяет определить начальный момент ослабления БТС

1. Контактно измеряют температуру БТС – $T_{убз}$.

2. Измеряют ток, протекающий в этом БТС, и определяют расчетное значение температуры исправного БТС – T_{ci} .

3. Измеряют температуру окружающего воздуха – T_{nc} .

4. Определяют $T_{кр}$ – скорректированное расчетное значение температурное БТС с учетом изменения температуры окружающего воздуха T_{nc} .

5. Непрерывно сравнивают значения температур $T_{кр}$ и $T_{убз}$. По превышению температуры БТС расчетного значения судят об увеличении переходного сопротивления болтового соединения, что является критерием определения начального момента предаварийной ситуации.

6. Достижение температуры БТС критической величины, на пример $100^{\circ}C$, является определяющим моментом отключения оборудования от сети.

На рис. 1 представлена функциональная модель метода определения начального момента ослабления болтового соединения.

Графическая интерпретация метода выявления начального момента ослабления болтового соединения представлена на рис. 2.

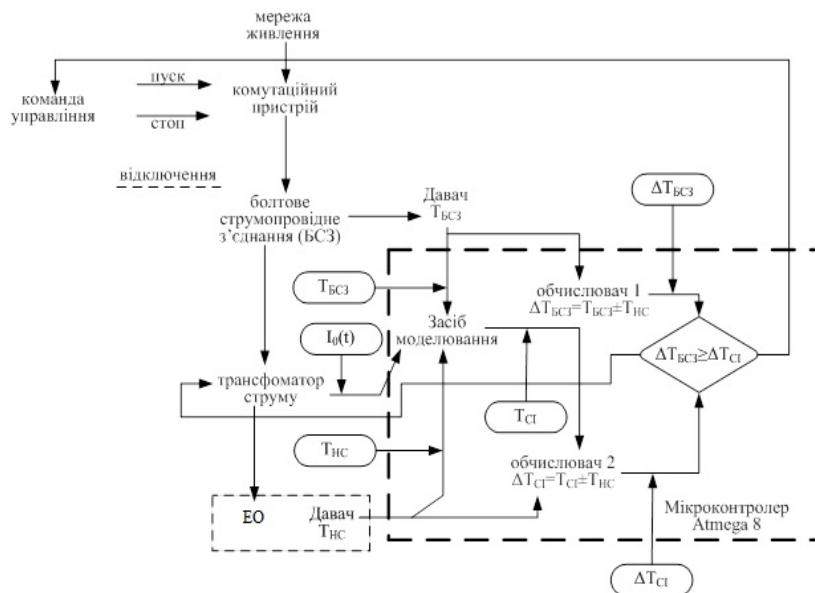


Рис. 1. Функциональная модель метода определения начального момента ослабления болтового соединения

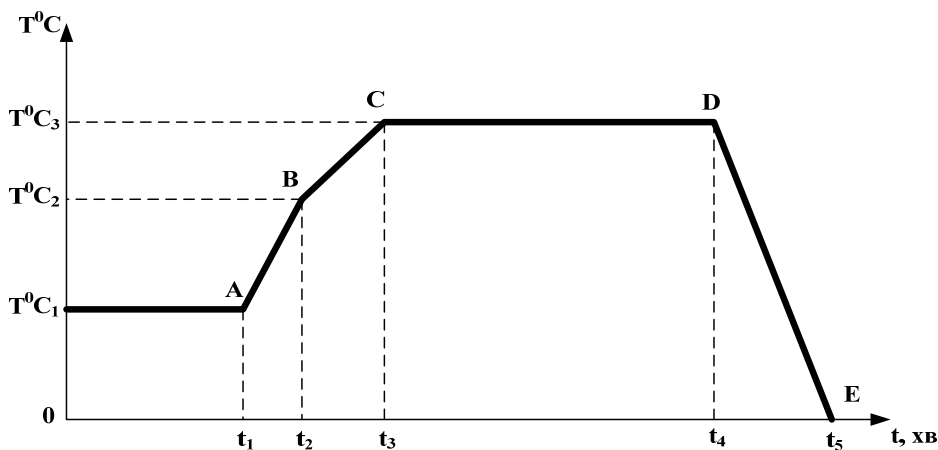


Рис. 2. Графическая интерпретация метода

Пояснения к рис. 2:

- Диапазон $(0-T^0C_1)$ и $(0-t_1)$ – рабочий диапазон работы оборудования;
- Диапазон $AB (T^0C_1-T^0C_2)$ и (t_1-t_2) – предаварийная ситуация;
- Диапазон $BC (T^0C_2-T^0C_3)$ и (t_2-t_3) – начало развития аварийного режима;
- Диапазон $CD (T^0C_3)$ и (t_3-t_4) – аварийная ситуация (время принятия решения);
- Диапазон $DE (T^0C_3-0)$ и (t_4-t_5) – катастрофа – выход оборудования из строя.

Условия выявления начального момента ослабления БТС соединения при стационарном и непрерывном процессе тока нагрузки позволяют оценочные булевых функций.

Обозначения булевых переменных:

- $X_1 = \langle 0 \rangle$ – логический ноль – при отсутствии тока.
- $X_1 = \langle 1 \rangle$ – логическая единица – при протекании тока в БТС.
- $X_2 = \langle 0 \rangle$ – при выполнении неравенства $(T_{c1} + (24^{\circ}C - T_{nc})) > (T_{\bar{\theta}3})$,
- $X_2 = \langle 1 \rangle$ – при выполнении неравенства $(T_{c1} + (24^{\circ}C - T_{nc})) < (T_{\bar{\theta}3})$,
- $X_3 = \langle 0 \rangle$ – при выполнении неравенства $(T_{\bar{\theta}3}) < (T_{кр})$,
- $X_3 = \langle 1 \rangle$ – при выполнении неравенства $(T_{\bar{\theta}3}) > (T_{кр})$.

Совершенной дизъюнктивной новой формой СДНФ [12], описывающей состояние болтового соединения, является выражение:

$$(X_1 \cap X_2 \cap X_3) \cup (X_1 \cap \overline{X_2} \cap \overline{X_3}) \cup (\overline{X_1} \cap X_2 \cap \overline{X_3}) \cup (\overline{X_1} \cap \overline{X_2} \cap X_3), \quad (7)$$

где $\cup, \cap, \overline{X_3}$ – соответственно символы конъюнкции, дизъюнкции и отрицания.

Минимизированные булевы функции для различных режимов болтового соединения имеют вид:
Нормальному режиму работы соответствует оценочная функция:

$$f_{p.p} = (X_1 \cap \overline{X_2} \cap \overline{X_3}) = (1, 0, 0) \quad (8)$$

Наступлению начального момента ослаблению болтового соединения соответствует оценочная функция:

$$f_{осл\ бз} = (X_1 \cap X_2 \cap \overline{X_3}) = (1, 1, 0) \quad (9)$$

Наступлению аварийного режима, приводящего к отключению объекта соответствует оценочная функция вида:

$$f_{ав.p} = (X_1 \cap X_2 \cap X_3) = (1, 1, 1) \quad (10)$$

Характер изменения токовой нагрузки обусловлен технологическим режимом работ оборудования, а стационарный и детерминированный характер изменения величины тока является частным случаем не стационарного режима. На рис. 3 приведен график циклического изменения тока нагрузки при работе ЭО с повторно кратковременными режимами (пресс, компрессоры, электроприводы заполнения и откачки резервуаров, рентгеновские компьютерные томографы и др.). Изменения величины тока дискретно, монотонно убывающей или возрастающей приведет к появлению переходного процесса нагревания и охлаждения БТС, при котором температура БТС будет изменяться по убывающей или возрастающей экспоненциальной зависимости. Изменение температуры окружающего воздуха так же монотонно возрастает или убывает. В режимах не стационарности токовой нагрузки важным является выявление участков стационарности.

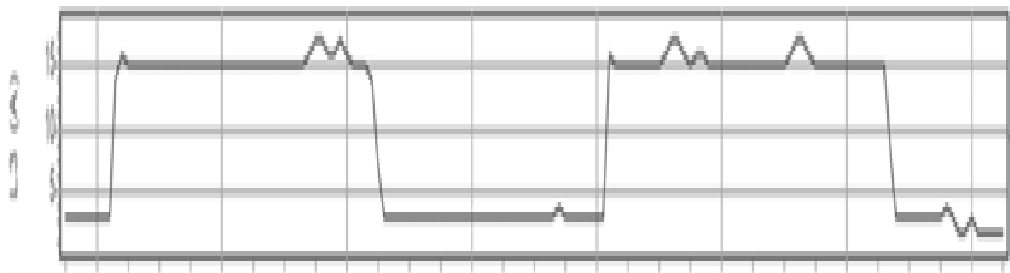


Рис. 3. Оциллограмма циклического изменения токовой нагрузки

Особенностью выявления начального момента БТС в режиме изменения величин тока и температуры окружающего воздуха является выбор участков удовлетворяющих одновременной стационарности всех контролируемых параметров. Для выбора участков стационарности введем дополнительные аргументы:

$$X_4 - \langle 0 \rangle - \text{при выполнении условия } \frac{dI_n}{dt} \neq 0,$$

$$X_4 - \langle 1 \rangle - \text{при выполнении условия } \frac{dI_n}{dt} = 0.$$

$$X_5 - \langle 0 \rangle - \text{при выполнении условия } \frac{dT_{nc}}{dt} \neq 0,$$

$$X_5 - \langle 1 \rangle - \text{при выполнении условия } \frac{dT_{nc}}{dt} = 0.$$

$$X_6 - \langle 0 \rangle - \text{при выполнении условия } \frac{dT_{бз}}{dt} \neq 0,$$

$$X_6 - \langle 1 \rangle - \text{при выполнении условия } \frac{dT_{бз}}{dt} = 0.$$

Булевых функций от шести переменных существует $2^6 = 64536$.

Минимизированные оценки булевых функций для выявления ослабленного и аварийного режимов болтового соединения имеют вид. Наступление начального момента ослаблению болтового соединения соответствует функция:

$$f_{осл\ бз} = (X_1 \cap X_2 \cap \overline{X_3}) \sim (X_4 \cap X_5 \cap X_6) = (1, 1, 0, 1, 1, 1) \quad (11)$$

Наступлению аварийного режима, приводящего к отключению объекта, соответствует функция

$$f_{ав.p} = (X_1 \cap X_2 \cap X_3) \sim (X_4 \cap X_5 \cap X_6) = (1, 1, 1, 1, 1, 1) \quad (12)$$

где ~ символ эквивалентности.

Для выявления начального момента ослабления болтового соединения разработаны новые методы, устройства неразрушающего контроля и программное обеспечения, используемые в устройствах [8, 9].

Выводы

1. Диагностика предаварийного режима ослабления токоведущего соединения описывают оценочные булевы функции, учитывающие изменения тока нагрузки и температуры окружающего воздуха.

2. Для нестационарных режимов тока выявления начального момента контактного токоведущего болтового соединения возможно только в участок одновременной стационарности контролируемых величин.

3. Своевременное выявления начального момента ослабления БТС позволяет перейти от системы ППР к системе обслуживания ЭО по факту выявления дефекта.

Литература

1. Власов А. Б. Тепловизионная диагностика объектов электро- и теплоэнергетики (диагностические модели) / А. Б. Власов. – Мурманск : Изд-во МГТУ, 2005. – 265 с.

2. Кривонос В. Е. Критерии диагностики винтовых соединений в ультразвуковой томографической аппаратуре / В. Е. Кривонос, С. М. Злепко, Р. М. Вирозуб, Д. М. Барановский // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. – 2017. – Випуск № 1. – С. 52–57.

3. Измайлов В. В. Автоматизированная система прогнозирования остаточного ресурса электроконтактных соединений / В. В. Измайлов, А. Е. Наумов // Программные продукты и системы. – 2008. – № 2. – С. 73–75.

4. Злепко С.М. Алгоритм діагностики стану болтового струмопровідного з'єднання комп'ютерного томографа / С.М. Злепко, В.Е. Кривонос, Т.А. Чернишова, Я.І. Ярославський // ВКДТС. – Вінниця, 2017. – С. 248–250.

5. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей : утв. 25.07.06, № 258 / Мин-во топлива и энергетики Украины. – Х. : «Индустрия», 2007. – 288 с.

6. Федоров А. А. Справочник энергетика промышленных предприятий. Том 1. Электроснабжение / Федоров А. А. – 1961. – 569 с.

7. Пат. RU № 2408120, H02H5/04, 2009. Устройство для контроля температуры контактных соединений в устройствах, находящимся под высоким напряжением.

8. Пат. № 107749 Україна МПКН02Н 5/04. Спосіб контролю за станом болтових з'єднань електрообладнання, що працює зі змінним навантаженням / Кривонос В. Е. – № а 201309491, опубл. 10.02.2014 : Бюл. № 3. – 4 с.

9. Комп'ютерна програма діагностики стану болтових з'єднань і контролю цілісності струмових ланцюгів / В. Є. Кривонос, С. М. Злепко, Є. Л. Піротті, В. В. Кривонос, А. О. Борякін // Свід. № 77423 від 06.03.2018.

10. Сыромятников И. А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / Сыромятников И. А.; под ред. М. Л. Мамиконянца. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.

11. Патент на корисну модель № 127922 Україна МПКН02Н 5/04. Пристрій діагностування ослаблення болтових струмоведучих з'єднань і обриву струмоведучих частин системи електропостачання електроприймача / Кривонос В. Е, Піротті Є. Л. и др. – заявка № 2018 02711, опубл. 27.08.2018, Бюл. № 16. – 4 с.

References

1. Vlasov A. B. Teplovizionnaya diagnostika obektov elektro- i teploenergetiki (diagnosticheskie modeli) / A. B. Vlasov. – Murmansk : Izd-vo MGTU, 2005. – 265 s.

2. Krivonosov V. E. Kriterii diagnostiki vintovykh soedinenij v ultrazvukovoj tomograficheskoj apparature / V. E. Krivonosov, S. M. Zlepko, R. M. Virozub, D. M. Baranovskij // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2017. – Vypusk № 1. – S. 52–57.

3. Izmajlov V. V. Avtomatizirovannaya sistema prognozirovaniya ostatochnogo resursa elektrokontaktnykh soedinenij / V. V. Izmajlov, A. E. Naumov // Programmnye produkty i sistemy. – 2008. – № 2. – S. 73–75.

4. Zlepko S.M. Alhorytm diahnostryky stanu boltovoho strumoprovodnoho ziednannia kompiuternoho tomografa / S.M. Zlepko, V.E. Kryvonosov, T.A. Chernyshova, Ya.I. Yaroslavskiy // VKDTS. – Vinnytsia, 2017. – S. 248–250.

5. Pravila tehniczeskoj ekspluatatsii elektroustanovok potrebitelej : utv. 25.07.06, № 258 / Min-vo topliva i energetiki Ukrainy. – H. : «Industriya», 2007. – 288 s.

6. Fedorov A. A. Spravochnik energetika promyshlennykh predpriyatij. Tom 1. Elektrosnabzhenie / Fedorov A. A. – 1961. – 569 s.

7. Pat. RU № 2408120, H02H5/04, 2009. Ustrojstvo dlya kontrolya temperatury kontaktnykh soedinenij v ustrojstvah, nahodyashimsya pod vysokim napryazheniem.

8. Pat. № 107749 Ukraina MPKN02N 5/04. Sposib kontroliu za stanom boltovykh ziednan elektroobladnannia, shcho pratsiuie zi zminnym navantazhenniam / Kryvonosov V. E. – № а 201309491, opub. 10.02.2014 : Biul. № 3. – 4 s.

9. Kompiuterna prohrama diahnostryky stanu boltovykh ziednan i kontroliu tsilisnosti strumovykh lantsiuhiv / V. Ye. Kryvonosov, S. M. Zlepko, Ye. L. Pirotti, V. V. Kryvonosov, A. O. Boriakin // Svid. № 77423 vid 06.03.2018.

10. Syromyatnikov I. A. Rezhimy raboty asinhronnykh i sinhronnykh dvigatelej / Syromyatnikov I. A.; pod red. M. L. Mamikonyanca. – M. : Energoatomizdat, 1984. – 240 s.

11. Patent na korysnu model № 127922 Ukraina MPKN02N 5/04. Prystrii diahnostuvannia oslablennia boltovykh strumoveduchykh ziednan i obryvu strumoveduchykh chastyn systemy elektropostachannia elektroprymacha / Kryvonosov V. E, Pirotti Ye. L. y dr. – zaiavka № 2018 02711, opubl. 27.08.2018, Biul. № 16. – 4 s.

Рецензія/Peer review : 27.4.2019 р.

Надрукована/Printed : 1.6.2019 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Кичак В.М.

А.О. СЯСЬКИЙ, Н.В. ШЕВЦОВА
Рівненський державний гуманітарний університет
О.Ю. ДЕЙНЕКА

Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне

МІЖФАЗНИЙ РОЗРІЗ В ІЗОТРОПНІЙ ПЛАСТИНЦІ З КРИВОЛІНІЙНИМ КОНТУРОМ, ПІДСИЛЕНИМ ЗАМКНЕНИМ ПРУЖНИМ РЕБРОМ

В умовах узагальненого плоского напруженого стану, створеного рівномірно розподіленими на нескінченності зусиллями, розглянуто мішану контактну задачу для нескінченної ізотропної пластинки з криволінійним отвором, контур якого підсилений замкненим пружним ребром, за наявності на межі поділу матеріалів пластинки і ребра симетричного міжфазного розрізу нульової ширини. Пластинка і пружне ребро мають спільну серединну площину. Моделюючи підсилювальне ребро криволінійним стрижнем сталого прямокутного поперечного перерізу, серединна поверхня якого не співпадає з поверхнею отвору, а сполучення пластинки і ребра – ідеальним механічним контактом, побудовано систему сингулярних інтегрально-диференціальних рівнянь для визначення контактних зусиль між пластинкою і ребром та внутрішніх сил і моментів у ребрі. Для розрахунку початкових параметрів у статично невизначеному підсилювальному ребрі використано умови однозначності зміщення точок його осі і кутів повороту поперечних перерізів. Встановлено структуру шуканих функцій на кінцях ділянки сполучення пластинки і ребра. Наближений розв'язок задачі побудовано методом механічних квадратур і колокації, яким досліджено вплив фізико-геометричних параметрів ребра і форми отвору на розподіл напружень в пластинці та підсилювальному ребрі. З'ясовано, що компоненти напружено деформованого стану в ребрі на кінцях ділянки сполучення приймають обмежені значення.

Ключові слова: міжфазний розріз, ізотропна 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, Ukraine
O.Y. DEJNEKA

National University of Water Management and Natural Resources, Rivne

INTERFACIAL INCISION IN ISOTROPIC PLATE WITH CURVILINEAR CONTOUR, REINFORCED BY A CLOSED RESILIENT RIB

In the conditions of generalized plane stressed state, created by forces evenly distributed at infinity, a mixed contact problem for an infinite isotropic plate with an curvilinear 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. The plate and resilient rib have a common median plane. 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, and the combination of the plate and the rib - an ideal mechanical contact, the system of singular integral-differential equations for determining the contact forces between the plate and the rib and the internal forces and moments in the rib are constructed. The boundary conditions of the problem are formulated in the form of conditions for the joint deformation of the plate and the rib. To calculate the initial parameters in a statically undefined reinforcing rib, the conditions for the uniqueness of the displacement of the points of its axis and the angles of rotation of the cross sections are used. 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 was constructed by the method of mechanical quadratures and collocation, with which investigated the influence of the physico-geometric parameters of the rib and the shape of the opening on the distribution of stresses in the plate and the reinforcing rib. It was found out that the components of a tense deformed state in the rib at the ends of the junction area take limited values.

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

Вступ

Підвищення надійності деталей машин і споруд у вигляді пластин з криволінійними отворами, контури яких підсилені замкненими ребрами, є однією з ключових проблем сучасного машинобудування і будівництва. Їх довговічність значною мірою залежить від наявності на поверхні поділу матеріалів дефектів типу тріщин (розрізів нульової ширини). Такі дефекти можуть виникати на стадії виготовлення, або в процесі експлуатації, що призводить до суттєвого зниження допустимого граничного навантаження на деталь та росту тріщини і, як наслідок, до руйнування деталі.

На даний час у науковій літературі достатньо повно розроблені методи дослідження напруженого стану нескінченних ізотропних та анізотропних пластин з криволінійними отворами, контури яких підсилені замкненими ребрами жорсткості у вигляді пружної лінії або пружного стрижня. Використовуючи останню модель підсилювального ребра, в роботах [1–3] розглянуто низку задач про контактну взаємодію нескінченної ізотропної (ортотропної) пластинки з криволінійним отвором і замкненого пружного ребра, які перебувають в умовах узагальненого плоского напруженого стану, при їх сполученні з гарантованим натягом або методом зварювання.

За наявності міжфазного розрізу між пластинкою і підсилювальним ребром такі задачі досліджені недостатньо. Так, в роботах [4, 5] побудовано наближені розв'язки задачі для ізотропної та ортотропної

пластинки з круговим отвором, а в роботі [6] – ортотропної пластинки з еліптичним отвором. Випадки криволінійних отворів загального вигляду не розглядалися.

Пропонується наближений розв'язок задачі про часткове підсилення контуру криволінійного отвору в нескінченній ізотропній пластинці замкненим пружним ребром за наявності симетричного міжфазного розрізу, береги якого в процесі деформації не контактують.

Постановка задачі

Розглянемо нескінченну ізотропну пластинку товщиною $2h$ з криволінійним отвором, контур якого Γ 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 взаємно перпендикулярними зусиллями p і q , що діють на нескінченності. Тому 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 отвору і визначала один із напрямків силового навантаження на пластинку [6].

Припустимо, що зовні симетричної ділянки $[-\alpha_0^*, \alpha_0^*]$ (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 дослідження впливу на ці величини міжфазного розрізу, форми отвору і відносної жорсткості підсилення.

Основні рівняння задачі

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

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

Нехай форма криволінійного отвору в пластинці визначається функцією [7]

$$z = x + iy = \omega(\zeta) = R_0 \left(\zeta + \frac{\varepsilon_1}{\zeta} + \frac{\varepsilon_2}{\zeta^2} \right), \quad (1)$$

що реалізує конформне відображення зовнішності одиничного кола в площині $\zeta = \tilde{r}e^{i\lambda}$ на область, яку займає серединна площина пластинки. Тут $R_0 = 1$ – характерний розмір отвору; $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – параметри, що характеризують відхилення форми контуру Γ від кола; (\tilde{r}, λ) – полярні координати точок в площині ζ ; $i = \sqrt{-1}$. За умови $|\varepsilon_1| + 2|\varepsilon_2| < 1$ функція (1) визначає контур Γ як комбінацію кола, еліпса і правильного трикутника із закругленими кутами.

При заданому навантаженні на пластинку параметри деформації контуру Γ (ε_λ – відносне видовження, V – кут повороту нормалі) визначаються за формулами [8]

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

$$V = \frac{1}{2Eh(\alpha^2 + \beta^2)} \left[(1-\nu)(\alpha^2 + \beta^2)S_{p\lambda}(\lambda) + \frac{1}{\pi} \int_{-\alpha_0}^{\alpha_0} [\Phi_1(\lambda, t)S_{p\lambda}(t) - \Phi_2(\lambda, t)T_p(t)] dt + \alpha(\lambda)\tilde{V}^0 - \beta(\lambda)\tilde{\varepsilon}_\lambda^0 \right], \quad (2)$$

в яких введено позначення

$$\Phi_1(\lambda, t) = -G(\lambda, t) + H(\lambda, t) \operatorname{ctg} \frac{\lambda-t}{2}; \quad \Phi_2(\lambda, t) = H(\lambda, t) + G(\lambda, t) \operatorname{ctg} \frac{\lambda-t}{2};$$

$$G(\lambda, t) = \alpha(\lambda)\alpha(t) + \beta(\lambda)\beta(t); \quad H(\lambda, t) = \alpha(\lambda)\beta(t) - \beta(\lambda)\alpha(t); \quad \alpha + i\beta = \omega'(\sigma); \quad \sigma = e^{i\lambda};$$

$$\tilde{\varepsilon}_\lambda^0 + i(\lambda)\tilde{V}^0 = 2(p-q)e^{-2i\lambda} + (p+q)[2 - \alpha(\lambda) - i\beta(\lambda)]; \quad (3)$$

E, ν – модуль Юнга і коефіцієнт Пуассона матеріалу пластинки; $[-\alpha_0, \alpha_0]$ – образ ділянки $[-\alpha_0^*, \alpha_0^*]$ при відображенні (1).

Кільцеві зусилля T_λ на контурі Γ визначаються зі співвідношення [8]

$$T_\lambda = \nu T_p + 2Eh\varepsilon_\lambda. \quad (4)$$

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

Умовно переріжемо стрижень площиною $\theta = -\pi$, а 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 статично визначений розімкнений стрижень, який перебуває у рівновазі під дією навантаження на його торцях і контактних зусиль (рис. 2) [6].

Компоненти напруженого стану стрижня надамо у вигляді [6]

$$N = -N_0 \cos \theta + \tilde{N}; \quad Q = -N_0 \sin \theta + \tilde{Q}; \quad L_b = L_b^0 + (x - x_0 - \eta(1 + \cos \theta))N_0 + \tilde{L}_b, \quad (5)$$

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, 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 використанням гіпотези плоских перерізів [9, 10]:

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

$$T_p = \frac{\tilde{N}(\lambda)}{\rho} - \frac{d\tilde{Q}(\lambda)}{ds}; \quad S_{p\lambda} = -\frac{\tilde{Q}(\lambda)}{\rho} - \frac{d\tilde{N}(\lambda)}{ds}; \quad \frac{d\tilde{L}_b(\lambda)}{ds} - \eta \frac{d\tilde{N}(\lambda)}{ds} - \tilde{Q}(\lambda) = 0, \quad (6)$$

в яких ρ – радіус кривини контуру Γ ;

- фізичні залежності між компонентами деформації і внутрішніми силами для зовнішнього поздовжнього волокна стрижня, яке контактує з пластинкою

$$\varepsilon_\lambda^{(c)} = \frac{1}{E_0 F_0} \left\{ \tilde{N}(\lambda) - N_0 \cos \theta + \frac{\eta + \eta_c}{\omega_0} \left(1 - \frac{\eta}{\rho} \right) \left[\tilde{L}_b(\lambda) + L_b^0 + (x - \eta \cos \theta - x_0 - \eta) N_0 \right] \right\}; \quad (7)$$

$$\frac{d\theta_b}{d\theta} = \frac{1}{E_0 F_0} \left\{ \tilde{N}(\lambda) - N_0 \cos \theta + \frac{\rho - \eta}{\omega_0} \left[\tilde{L}_b(\lambda) + L_b^0 + (x - \eta \cos \theta - x_0 - \eta) N_0 \right] \right\}, \quad \lambda \in [-\pi; \pi].$$

Тут введено позначення: $\varepsilon_\lambda^{(c)}, \theta_b$ – відносне видовження волокна і кут повороту нормалі до нього; $E_0 F_0$ – жорсткість стрижня на розтяг (стиск); $F_0 = 2h_0 \cdot 2\eta$ – площа поперечного перерізу; E_0 – модуль Юнга матеріалу стрижня; η_c – відстань від осі стрижня до нейтрального для чистого згину поздовжнього волокна; $\omega_0 = (\rho - \eta)\eta_c$; $\eta_c = \rho - \eta - 2\eta / \ln[\rho / (\rho - 2\eta)]$ [11].

- умови рівноваги підсилювального ребра як жорсткого цілого

$$\int_{-\alpha_0}^{\alpha_0} (T_p(\lambda) + iS_{p\lambda}(\lambda)) e^{i\lambda} \omega'(\sigma) d\lambda = 0; \quad \tilde{L}_b(\alpha_0) - \eta \tilde{N}(\alpha_0) - \int_{-\alpha_0}^{\alpha_0} \tilde{Q}(\lambda) |\omega'(\sigma)| d\lambda = 0, \quad (8)$$

які з урахуванням симетрії задачі відносно осі Ox і формул (5) можна перетворити до вигляду

$$\tilde{N}(\pm\alpha_0) = \tilde{Q}(\pm\alpha_0) = \tilde{L}_b(\pm\alpha_0) = 0. \quad (9)$$

Початкові параметри N_0, L_b^0 визначаються з умов однозначності зміщень точок осі стрижня та кута повороту нормалі його поперечного перерізу [6]

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

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

$$\int_{-\alpha_0}^{\alpha_0} \left[\frac{\tilde{N}(\lambda)}{\rho} + \left(1 - \frac{\eta}{\rho} \right) \frac{\tilde{L}_b(\lambda)}{\omega_0} \right] |\omega'(\sigma)| d\lambda + \frac{1}{\omega_0} \int_{-\pi}^{\pi} \left(1 - \frac{\eta}{\rho} \right) \left[L_b^0 + N_0 (x - (\eta + \eta_c) \cos \theta - x_0 - \eta) \right] |\omega'(\sigma)| d\lambda = 0. \quad (10)$$

Співвідношення (6), (7), (9), (10) 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

$$\varepsilon_\lambda = \varepsilon_\lambda^{(c)}; \quad V = \theta_b; \quad \lambda \in [-\alpha_0; \alpha_0]. \quad (11)$$

Підставляючи до них співвідношення (2), (7) 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 .

$$\begin{aligned} & \frac{E_0 F_0}{2Eh(\alpha^2 + \beta^2)} \left\{ (1-\nu)(\alpha^2 + \beta^2) T_\rho(\lambda) + \frac{1}{\pi} \int_{-\alpha_0}^{\alpha_0} [\Phi_1(\lambda, t) T_\rho(t) + \Phi_2(\lambda, t) S_{\rho\lambda}(t)] dt + \alpha(\lambda) \tilde{\varepsilon}_\lambda^0 + \beta(\lambda) \tilde{V}^0 \right\} = \\ & = \tilde{N}(\lambda) - N_0 \cos \theta + \frac{\eta + \eta_c}{\omega_0} \left(1 - \frac{\eta}{\rho} \right) \left[\tilde{L}_b(\lambda) + L_b^0 + (x - \eta \cos \theta - x_0 - \eta) N_0 \right]; \\ & \frac{E_0 F_0}{2Eh(\alpha^2 + \beta^2)} \left\{ (1-\nu)(\alpha^2 + \beta^2) S_{\rho\lambda}(\lambda) + \frac{1}{\pi} \int_{-\alpha_0}^{\alpha_0} [\Phi_1(\lambda, t) S_{\rho\lambda}(t) - \Phi_2(\lambda, t) T_\rho(t)] + \alpha(\lambda) \tilde{V}^0 - \beta(\lambda) \tilde{\varepsilon}_\lambda^0 \right\} dt = \\ & = \int_{-\pi}^{\lambda} \left[\tilde{N}(\lambda) - N_0 \cos \theta + \frac{\rho - \eta}{\omega_0} \left[\tilde{L}_b(\lambda) + L_b^0 + (x - \eta \cos \theta - x_0 - \eta) N_0 \right] \right] |\omega'(\sigma)| d\lambda. \end{aligned} \quad (12)$$

Її доповнюємо умовами зв'язку між функціями T_ρ , $S_{\rho\lambda}$ і \tilde{N} , \tilde{Q} , \tilde{L}_b (6) та співвідношеннями (10). Рівняння (6), (10), (12) визначають математичну модель задачі і слугують для визначення контактних зусиль між пластинкою і підсилювальним ребром та внутрішніх силових факторів у ребрі. Покладаючи в них $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0$, одержимо відповідну модель для ізотропної пластинки з круговим отвором [4].

Наближений розв'язок задачі

Точний розв'язок системи (6), (10), (12) знайти не вдається. Для її наближеного розв'язання необхідно встановити структуру шуканих функцій на кінцях ділянки сполучення пластинки та ребра.

На підставі умов (9) можна зробити висновок, що функції \tilde{N} , \tilde{Q} і \tilde{L}_b обмежені і 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 [7], 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 можна побудувати комбінованим методом механічних квадратур і колокації [8, 12, 13], квадратурні формули якого наведені в роботах [13].

Якщо функції T_ρ , $S_{\rho\lambda}$ і \tilde{N} , \tilde{Q} , \tilde{L}_b і сталі N_0 , L_b^0 стануть відомі, то внутрішні зусилля і моменти в ребрі визначаються за формулами (5), а кільцеві зусилля T_λ на контурі Γ в пластинці – зі співвідношення (4).

Нормальні напруження в зовнішньому і внутрішньому поздовжніх волокнах ребра знаходимо за законом Гука [11]

$$\sigma^{(1)} = \frac{1}{F_0} \left[N + \frac{\eta + \eta_c}{\rho} \cdot \frac{\rho - \eta}{\omega_0} L_b \right]; \quad \sigma^{(2)} = \frac{1}{F_0} \left[N + \frac{\eta_c - \eta}{\rho - 2\eta} \cdot \frac{\rho - \eta}{\omega_0} L_b \right], \quad (13)$$

а найбільші дотичні напруження в осьовому волокні – за формулою Журавського [11] $\tau_{\max}^{(c)} = 1.5 \cdot Q / F_0$.

Для пластинки і підсилювального ребра з фізико-геометричними параметрами $\alpha_0 = 2\pi/3$; $h_0/h = 4/3$; $\eta/R_0 = 0.5$; $\nu = 0.3$; $\varepsilon_1 = 0.1$; $\varepsilon_2 = 0.1$ досліджено вплив на їх напружений стан відносної жорсткості підсилення E_0/E .

Результати числового розрахунку величин T_ρ , $S_{\rho\lambda}$, T_λ , $\sigma^{(1)}$, $\sigma^{(2)}$, τ_{\max} при $p = p$, $q = 0$ наведені на рис. 1–3. Суцільні лінії побудовано для випадку $E_0/E = 1$, штрихові – $E_0/E = 5$, штрих-пунктирні – $E_0/E = 10$. Пунктирна лінія відповідає випадку непідкріпленого контуру ($E_0/E = 0$).

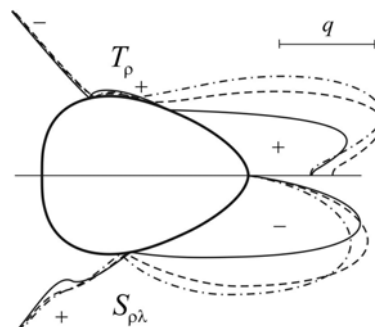


Рис. 1. Епюри розподілу контактних зусиль на контурі Γ в пластинці

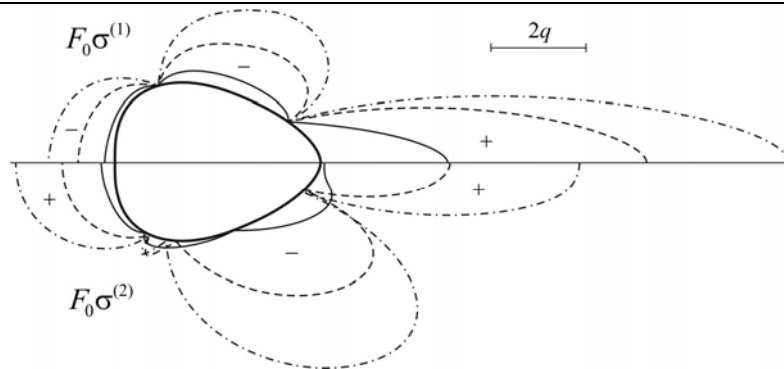


Рис. 2. Епюри розподілу нормальних напружень в крайніх волокнах підсилювального ребра

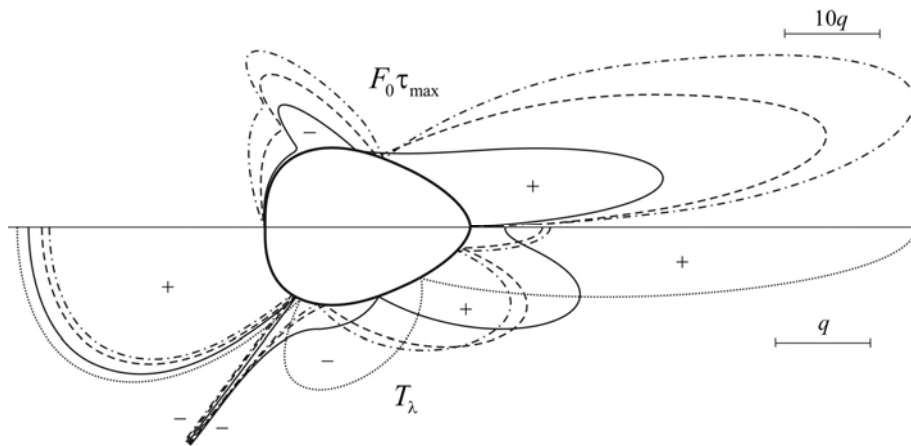


Рис. 3. Епюри розподілу максимальних дотичних напружень в осьовому волокну підсилювального ребра і кільцевих зусиль на контурі Γ в пластинці

Аналізуючи результати числового розрахунку, приходимо до таких висновків:

- наявність міжфазного розрізу між пластинкою і підсилювальним ребром призводить до суттєвої зміни всіх розрахункових величин;
- контактні зусилля в пластинці зростають при збільшенні E_0/E і приймають необмежені значення на кінцях ділянки її сполучення з ребром;
- наявність підсилювального ребра на ділянці з найбільшою кривиною різко зменшує на цій ділянці концентрацію кільцевих зусиль, залишаючи її практично незмінною на ділянці міжфазного розрізу;
- нормальні напруження в крайніх поздовжніх волокнах ребра залишаються обмеженими, набуваючи екстремальних значень, які зростають при збільшенні E_0/E , на ділянках з найбільшою та найменшою кривиною;
- поперечні сили не суттєво впливають на напружено деформований стан ребра і ними можна нехтувати в інженерних розрахунках.

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. 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.
3. Шереметьєв М.П. Пластинки с подкрепленным краем / М.П. Шереметьєв. – Львов : Изд-во Львовского университета, 1960. – 258 с.
4. Сяський А.О. Міжфазна тріщина в нескінченній ізотропній пластинці з підкріпленням 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.
5. Сяський А.О. Міжфазний розріз в ортотропній пластинці з підсиленням круговим отвором / А.О. Сяський, Н.В. Шевцова, О.Ю. Дейнека // Вісник Хмельницького національного університету. – 2018. – № 5 (265). – С. 176–181.
6. Сяський А.О. Міжфазний розріз в ортотропній пластинці з еліптичним контуром, підсиленням замкненим пружним ребром / А.О. Сяський, Н.В. Шевцова, О.Ю. Дейнека // Вісник Хмельницького національного університету. – 2019. – № 1 (269). – С. 31–39.
7. Мухелишвили Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости /

Н.И. Мусхелишвили. – Москва : Наука, 1966. – 708 с.

8. Батишкіна Ю.В. Часткове підкріплення криволінійних отворів в пластинках тонкими пружними стержнями змінної жорсткості / Ю.В. Батишкіна // Математичні проблеми механіки неоднорідних структур. – Львів, 2003. – С. 316–318.

9. 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.

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. Писаренко Г.С. Опір матеріалів / Г.С. Писаренко, О.Л. Квітка, Є.С. Уманський. – Київ : Вища школа, 2004. – 655 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.

References

1. Martynovich T.L. Kontaknyye vzaimodejstviya plastin s uprugimi elementami / T.L. Martynovich, V.E. Yurinec. – Lvov : Vysshaya shkola. Izd-vo pri Lvov. un-te, 1984. – 160 s.

2. Bozhydarnik V.V. Mekhanika ruinovannia, 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 : Nadstyrnia, 2007. – 410 s.

3. Sheremetev M.P. Plastinki s podkreplennym kraem / M.P. Sheremetev. – Lvov : Izd-vo Lvovskogo universiteta, 1960. – 258 s.

4. 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. Seriya «Tekhnichni nauky». – 2017. – Vyp. 4 (80). – S. 168–176.

5. 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.

6. Siaskyi A.O. Mizhfaznyi rozriz v ortotropnii plastyntsi z eliptychnym konturom, pidsylenym zamknym pruzhnyim rebrom / A.O. Siaskyi, N.V. Shevtsova, O.Iu. Deineka // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2019. – № 1 (269). – S. 31–39.

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

8. Batyshkina Yu.V. Chastkove pidkriplennia kryvoliniinykh otvoriv v plastyntskakh tonkymy pruzhnyimi stержniami zminnoi zhorstkosti / Yu.V. Batyshkina // Matematychni problemy mekhaniky neodnorodnykh struktur. – Lviv, 2003. – S. 316–318.

9. Filin A.P. Algoritmy postroeniya razreshayushih uravnenij mekhaniki stержnevyyh sistem / A.P. Filin, O.D. Tananajko, I.M. Chernova, M.A. Shvarc. – Leningrad : Strojizdat, 1983. – 232 s.

10. Siaskyi A. Zastosuvannia metody syl dlia statychnoho rozrakhunku zamknennykh kryvoliniinykh stryzhniv / A. Siaskyi, N. Shevtsova // Visnyk Ternopilskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu. – 2015. – Т. 79, № 3. – С. 24–30.

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

12. Syaskij A.A. Napryazhennoe sostoyanie kusochno-odnorodnoj plastinki s uprugim vklyucheniem / A.A. Syaskij, V.A. Syaskij // Prikladnaya mehanika. – 1983. – Т. 19, № 5. – С. 94–99.

13. Syaskij A.A. Uprugoe ravновесие plastinki s chastichno podkreplennym krivolinejnym otverstiem / A.A. Syaskij // Prikladnaya matematika i mehanika. – 1986. – Т. 50, № 2. – С. 247–254.

Рецензія/Peer review : 26.5.2019 р.

Надрукована/Printed : 1.6.2019 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Бомба А.Я.

В.П. СВИДЕРСЬКИЙ, В.С. ЯРЕМЧУК

Хмельницький національний університет

Г.О. СІРЕНКО

Прикарпатський національний університет ім. Василя Стефаника

СТРУКТУРНО-ТЕХНОЛОГІЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ ЗАСПОКОЮВАЧА І НАТЯЖНОГО БАШМАКА ЛАНЦЮГА ГАЗОРОЗПОДІЛЬНОГО МЕХАНІЗМУ ДВИГУНА ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРАННЯ

Розроблено структурно-технологічну модель процесу виготовлення лабораторних зразків і пластин заспокоювача і натяжного башмака ланцюга газорозподільного механізму двигуна внутрішнього згорання з полімерного композиційного матеріалу (ПКМ) графелон-20. Детально описані режими технологічних операцій. Наведені властивості ПКМ графелон-20. Окреслено асортимент наповнювачів-модифікаторів і особливості структурної організації цього матеріалу. Сконструйовано пристрій для склеювання виготовленої пластини з металевою основою заспокоювача і башмака. Надані рекомендації щодо використання виконаних досліджень для виготовлення заспокоювача і натяжного башмака ланцюга газорозподільного механізму для автомобілів з ланцюговим приводом.

Ключові слова: двигун внутрішнього згорання, газорозподільний механізм

V.P. SVIDERSKYI, V.S. YAREMCHUK

*Khmelnytsky National University

H.O. SIRENKO

Vasyl Stefanyk Precarpathian National University

THE INCREASE OF WEAR RESISTANCE AND THE DEVELOPMENT OF THE TECHNOLOGY FOR PRODUCING THE GAS-DISTRIBUTING CHAIN GUIDE OF GEAR FOR

Based on the results of the analysis, evaluation of basic types of gas-distribution mechanism failures, including wear of the chain damper, has been done; critical parameters of this wear have been defined, which allowed proposing a theoretical model for calculation of dominating types of wear. Basic conditions of this model have been calculated for the scheme of contact of two cross cylinders, whose axis projections cross each other at a 90°-angle, one of the cylinders being stationary. Based on the obtained model, given the prescribed values of load, and friction path, calculation parameters of the model of steady wear, contact pressure in harness have been defined; the value of wear depending on friction path and coefficient of wear comparison for two adopted anti-friction materials (basic (СКН-40 rubber) and newly-proposed (графелон-20)) has been calculated. The results show that 'графелон-20' material prevails over the basic material almost in 5.4 times in terms of wear resistance. Based on the calculations done, a technological scheme of production of laboratory samples for research of 'графелон-20' material was tested and a technological process of production of damper plates was proposed. It envisages three basic operations: briquetting, pressing, and pasting of the produced plate to metal base. The author has provided a detailed description, characteristics, and some peculiarities of these operations, such as defining the temperature of heating while pressing, duration of heating, and the value of pressure needed.

Keywords: gas-distribution mechanism, chain damper, 'графелон-20', production technology.

Вступ. Газорозподільний механізм відіграє суттєве значення в роботі як двигуна, так і будь-якого транспортного засобу, на якому він встановлений, в цілому [1]. За його допомогою здійснюється подача палива в циліндри двигуна та відводяться продукти згорання. Привід цього механізму виконується за допомогою ланцюга або ременя, що з'єднує дві шестерні механізму. Таким чином, ланцюг або ремінь відіграє роль передавального механізму при роботі двигуна, і його розрив неминуче спричиняє припинення роботи двигуна. Спосіб приводу газорозподільного механізму – ремінь або ланцюг – рідко стає визначальним чинником при виборі автомобіля, але замислитись все-таки змушує. Якщо модель двигуна не характеризується малим ресурсом ланцюга, то ланцюговий привід дещо кращий ремінного. Ремінний привід витримує тільки пробіг до регламентної заміни, а ланцюг може експлуатуватись значно довше.

Конструктивно привід розподільного вала забезпечується дворядним втулково-роликівим ланцюгом від привідної зірочки, яка встановлена на колінчастому валу [2, 3]. Цим самим ланцюгом приводиться також в рух зірочка вала приводу мастильного насоса. Біля ланцюга розміщується натяжний башмак із заспокоювачем ланцюга, в конструкції яких передбачені гумові накладки.

Заспокоювач ланцюга і натяжний башмак газорозподільного механізму виготовлені зі сталі 10, на поверхні якої методом вулканізації нанесені гумові накладки. Сталь 10 (вміст вуглецю < 0,25 %) має невисоку твердість і, водночас, високу пластичність.

Гумові накладки заспокоювача і натяжного башмака – бутадієнітрильний каучук (продукт сумісної полімеризації бутадієну з нітрилом акрилової кислоти). Залежно від складу, каучук може бути різних марок: СКН-18, СКН-26, СКН-40. Наявність у молекулах каучуку групи –CN– надає йому полярні властивості. Чим вища полярність матеріалу, тим кращі його механічні та хімічні властивості і тим нижча морозостійкість (до прикладу, для СКН-18 – від «мінус» 50 °С до «мінус» 60 °С, для СКН-40 – від «мінус» 26 °С до «мінус» 28 °С).

У газорозподільному механізмі автомобілів ВАЗ, найбільш часто виходить з ладу заспокоювач і натяжний башмак ланцюга, які, як уже зазначалося, складаються з металевих пластин, на які нанесені методом вулканізації каучукові накладки, що досить швидко зношуються під постійною дією на них ланок ланцюга. Щоб забезпечити тривалу довговічність та достатню зносостійкість заспокоювача і натяжного

башмака, а при цьому і всього газорозподільного механізму, необхідно підвищити зносостійкість найбільш критичного елемента – матеріалу накладки. В роботах [2, 3] ця задача була вирішена за рахунок заміни базового матеріалу, в якості якого виступає каучук СКН-40 на антифрикційний матеріал графелон-20. Для забезпечення впровадження такої заміни необхідно розробити технологічну схему виготовлення заспокоювача і натяжного башмака ланцюга із застосуванням антифрикційного матеріалу графелон-20.

Мета дослідження. Ставиться задача розробити структурно-технологічну модель процесу формування складу, структури і властивостей полімерного композиційного матеріалу графелон-20 з застосуванням його для виготовлення пластин заспокоювача і натяжного башмака ланцюга газорозподільного механізму двигуна внутрішнього згорання. Крім того необхідно сконструювати пристрій для склеювання виготовленої пластини з металевою основою заспокоювача і натяжного башмака, а також надати рекомендації по використанню виконаних досліджень для виготовлення заспокоювача і натяжного башмака ланцюга газорозподільного механізму для автомобілів з ланцюговим приводом.

Основний розділ

1. Структурно-технологічна модель процесу виготовлення лабораторних зразків, пластини заспокоювача та натяжного башмака ланцюга з матеріалу «графелон-20». Структурно-технологічну модель процесу формування складу, структури і властивостей полімерного композиційного матеріалу графелон наведено на рис. 1.



Рис. 1. Структурно-технологічна модель процесу формування складу, структури і властивостей полімерного композиційного матеріалу «графелон»

Графелон – полімерний композиційний матеріал на основі ароматичного поліаміду, важких ароматичних поліефірів, пентапласту, полікарбонату, поліформальдегіду і його сополімерів, поліімідів, поліін-оксалинів, поліфенілхіноксалинів, поліоксадіазолів, полібензоксазолів, поліфеніленоксидів, поліфенілен-сульфідів, поліфеніленсульфонів чи їх сумішей та основного наповнювача – вуглецевого волокна, отриманого за спеціальною технологією і модифікованого спеціальними добавками і яке має наперед задане розподілення за довжиною [4, 5].

1.1. Формування складу. Багатокомпонентні складові графелона додатково містять дисперсні тверді мастила чи комплекс твердих мастил, порошки термопластичних полімерів, суміші вуглецевих волокон, які відрізняються за властивостями, волокна з жаростійких матеріалів чи металів і органічних термостійких полімерів, термостійкі рідини, модифікатори, окисли металів і алюмосилікати, антиокислювальні добавки.

1.2. Подрібнення і змішування компонентів. Складові графелона активаційно подрібнювали та змішували у млині МРП-1 з подовими ножами, які обертаються з частотою 7000 обертів за хвилину, діаметр ножів – 0,205 м за максимальною лінійною швидкістю (75 м/с) протягом 6 хв. Механічну активацію наповнювачів у складі композиції здійснювали з метою запобігання їх агломерації і підвищення структурної активності. Після змішування, композицію сушили в термошафі за температури 100–120 °С протягом 1 год.

Технологічний процес виготовлення лабораторних зразків та пластин заспокоювача і натяжного башмака передбачає декілька основних операцій [6].

1.3. Брикетування. Порошкові ароматичні поліаміди, які одержуються емульсійною поліконден-

сацією, як правило, мають низьку насипну щільність (0,15–0,25 г/см³). При завантаженні порошку в прес-форму, завантажувальну камеру необхідно було би робити значно більших розмірів, ніж готовий виріб, що допускається тільки для деяких видів деталей незначних габаритів.

У більшості випадків застосовують низьку завантажувальну камеру, в яку закладають прес-матеріал у вигляді брикетів, що одержані попереднім пресуванням порошку за кімнатної температури. Таким чином, крім зменшення габаритів прес-форм досягається покращення умов прогрівання прес-матеріалу у формах за рахунок збільшення теплопровідності. При використанні брикетів також покращується та прискорюється завантаження прес-матеріалу у форму, оскільки відпадає необхідність його розрівнювання, яку значно складніше виконувати за високої температури форми. При перенесенні матеріалу у вигляді брикету із сушильної шафи у прес-форму, завдяки нижчій гігроскопічності він поглинає менше вологи з повітря, ніж у випадку порошкової суміші. Із сухого порошкового матеріалу отримують достатньо міцні брикети щільністю 0,45 г/см³.

При виготовленні брикету, який за формою і розмірами подібний до виробу, необхідно враховувати, що його розміри при вийманні з форми, зберіганні, а особливо при нагріванні під час сушіння, збільшуються на 1,5–2 % порівняно з розмірами форми, в якій виконується брикетування. Тому необхідно передбачати зменшення розмірів форми для брикетування порівняно з формою для гарячого пресування, наближеної до кінцевих розмірів готового виробу.

Прес-форми для брикетування необхідно вибирати зі значною висотою завантажувальної камери, що розрахована на повний об'єм наважки порошку. Додаткове пресування прес-порошку при завантаженні не рекомендується – на готовому виробі при цьому появляються окремі смужки, що відповідають межам між підпресованою та знову підсипаною порціями матеріалу і що може негативно впливати на міцнісні характеристики виробів та викликати їх неоднорідності.

Ці неоднорідності у виробках виникають, якщо використовувати прес-матеріал у вигляді таблеток. Крім погіршення зовнішнього вигляду при застосуванні таблеток знижується міцність виробів, що особливо помітно при виготовленні виробів простих форм: пластин, циліндрів, втулок. У цих випадках прес-матеріал немає можливості для достатнього розтікання, тому границі розділення між таблетками повністю не зникають. Крім того, насипна щільність таблеток порівняно зі щільністю брикетів знижена майже на 60 %. Все це робить недоцільним застосування способу прямого пресування виробів із прес-матеріалу у вигляді таблеток. За великої площі і малої товщини виробів, прес-порошок перед брикетуванням потрібно ретельно розрівняти.

1.4. Пресування і термообробка виробів. Режимми технологічних операцій. Заготовки лабораторних зразків, пластин заспокоювача і натяжного башмака композиційного матеріалу на основі ароматичного поліаміду – графелон-20, виготовляли відповідно до рекомендованої послідовності [6].

Шихту композиційного матеріалу засипали в прес-форму, підпресовуючи декілька разів під тиском 30–35 МПа. Потім нагрівали утворений прес-матеріал за відсутності тиску до температури 335–340 °С, термостатуючи при цій температурі 5 хв, а також 5 хв – під тиском 45–50 МПа. Після цього нагрівання повністю припиняли, вмикали вентилятор і охолоджували прес-форму до температури 200–220 °С, підтримуючи тиск 45–50 МПа. Потім, за відсутності тиску, охолоджували прес-форму до температури 70–80 °С і виймали одержану заготовку у вигляді циліндра діаметром 10 мм. Після виготовлення, зразки перевіряли на міцність стисненням за ГОСТ 33519–2015 [7].

Зразки з ароматичних поліамідів у брикетованому вигляді, перед нагріванням до високої температури необхідно ретельно підсушувати від накопиченої атмосферної вологи, з метою запобігання термічної деструкції. Прес-порошки із матеріалу графелон-20 можна нагрівати на повітрі до порівняно високих температур, тому більш доцільно застосовувати звичайні сушильні шафи, а не складні вакуумні сушарки. Режим сушіння значно впливає на якість виробів. При переробці схильних до кристалізації полімерів, температуру сушіння необхідно знижувати, оскільки за її високих значень виникає впорядкованість структури полімеру, що призводить до збільшення кінцевої ламкості виробів.

Температура гарячого пресування ароматичних поліамідів вибирається з урахуванням експериментальної температурної залежності, яка впливає на міцність виробів. Вибір цих температур для полімерів, що кристалізуються, визначається порогом зниження в'язкості розплаву, яка зменшується з підвищенням температури та попередженням кристалізації, швидкість якої зростає при збільшенні температури. Тому оптимальною температурою пресування для графелона-20 прийнята температура 340 °С, за якої показники міцності виробів, у тому числі й ударна в'язкість, досягають максимальних значень.

Висушений брикет переносять у форму, нагріту до температури дещо вище 100 °С (для того, щоб полімер не поглинав вологу з повітря). Водночас, брикет недоцільно поміщати в форму, нагріту до максимальної температури, оскільки при такій схемі і форма, і брикет нагріваються послідовно, що збільшує загальний час прогрівання. Також необхідно врахувати, що одночасне нагрівання брикету і форми сприяє додатковому підсушуванню полімеру.

Однак, в деяких випадках, завантаження прес-матеріалу в форму має відбуватися за високої температури. Це виконують у випадку малих швидкостей нагрівання форми, з метою зменшення періоду знаходження полімеру при високих температурах, які негативно впливають на якість виробів. Для визначення і розрахунку часу, необхідного для рівномірного прогрівання прес-матеріалу по всьому об'єму, можна використовувати дані температуропровідності полімерів.

Якщо прес-матеріал за температури T_a , у формі брикету з розмірами, що збігаються з розмірами порожнини форми, завантажуються у форму, нагріту до певної постійної температури T_0 , то тривалість на-

грівання центральної частини брикету до заданої температури T_m можна оцінити за допомогою формули (1), яку застосовують для плоскопаралельної нескінченної пластини:

$$\tau_{i\bar{e}} = \frac{4}{\pi^2} \cdot \frac{\left(\frac{\delta}{2}\right)^2}{a_T} \cdot \ln\left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{\theta_a}{\theta_m}\right), \quad (1)$$

і для випадку циліндра безкінечної довжини:

$$\tau_{\bar{o}} = \frac{r^2}{5,79 \cdot a_T} \cdot \ln\left(1,6 \cdot \frac{\theta_a}{\theta_m}\right). \quad (2)$$

У формулах (1) та (2) використані наступні позначення: τ_{ni} та τ_{ci} – час прогрівання середини зразка пластини та циліндра, відповідно, год; δ – товщина пластини, м; r – радіус циліндра, м; a_T – коефіцієнт температуропровідності матеріалу, м²/год; θ_a та θ_m – різниця температур між формою і зразком матеріалу для пластини та циліндра, відповідно, °C, які визначаються із виразів (3).

$$\theta_a = T_0 - T_a; \quad \theta_m = T_0 - T_m. \quad (3)$$

Розрахункова тривалість прогрівання для попередньо вибраних параметрів $a_T = 4 \cdot 10^{-4}$ м²/год, $T_0 = 340$ °C, $T_a = 230$ °C та $T_m = 335$ °C (які відповідають умовам пресування графелона-20), наведена у таблиці 1.

Таблиця 1

Розрахункові значення тривалості прогрівання при пресуванні пластини або циліндра з графелона-20

Товщина плоского брикету (або радіус циліндра), мм	6,0	10,0	20,0	25,0	30,0	40,0	50,0
Тривалість прогрівання пластини, хв.	1,80	5,0	20,0	–*	45,0	80,0	–*
Тривалість прогрівання циліндра, хв.	–*	2,3	9,25	14,3	20,8	37,0	58,0

*дані відсутні.

При пресуванні пластин, тривалість прогрівання може бути значно зменшена як результат дії тиску на прес-матеріал під час процесу нагрівання. Якщо в момент прикладання тиску, температура перевищує температуру склування полімеру, прес-матеріал монолітується зі значним зменшенням товщини (для графелона-20 – удвічі), крім того, для монолітного матеріалу підвищується його температуропровідність. Розрахунки показують, що тривалість прогрівання пластини з графелона-20 до температури 300 °C, за відсутності тиску, а також під тиском, знижується більш ніж вдвічі, порівняно зі значеннями, які наведені у таблиці 1.

Зразки, одержані пресуванням, в багатьох випадках мають співвимірні розміри в різних напрямках. Теплообмін при цьому відбувається по всій зовнішній поверхні прес-матеріалу і приводить до прискорення прогрівання порівняно з пластиною, яка має нескінченні розміри.

Як уже зазначалося, тривалість нагрівання зменшується, якщо прес-матеріал вносять у форму за низької температури і прогрівають його разом з нею. При нагріванні форми з постійною швидкістю різниця температур в центрі зразка та на його поверхні визначається за формулами (4) та (5), відповідно:

– для циліндра

$$\Delta t = \frac{\omega r^2}{4a_T}; \quad (4)$$

– для пластини

$$\Delta t = \frac{\omega \delta^2}{8a_T}, \quad (5)$$

де Δt – перепад температур, °C; ω – швидкість нагрівання форми, °C/год; δ та r – товщина пластини і радіус циліндра, відповідно, м; a_T – коефіцієнт температуропровідності, м²/год.

Розрахунок за цими формулами показує, що перепад температур для швидкостей нагрівання 5–10 °C/хв в декілька разів менший порівняно з таким самим параметром в тому випадку, коли брикет переноситься у форму, що нагріта до максимальної температури.

Необхідно врахувати, що при одночасному нагріванні прес-матеріалу і форми до температури пресування, тільки в центрі зразка температура відстає на величину, яка розраховується за формулами (4) та (5), за більш нагрітих інших шарів матеріалу. Очевидно, що при цьому буде значним і виграш у часі.

Для вибору тиску пресування P_{np} досліджувалась залежність показників міцності виробів від нього. Однак, застосування при пресуванні високих тисків може призвести до збільшення внутрішніх напружень у готових зразках. Висока в'язкість розплаву ароматичних поліамідів ускладнює релаксацію внутрішніх напружень, значення яких тим більші, чим вищий тиск пресування. Тому при пресуванні зразків простої форми і невеликих за висотою (до 15 мм), тиск P_{np} становить 40–50 МПа. При пресуванні ароматичних поліамідів температура, за якої прикладається тиск, визначається низкою факторів. Одним з них є необхідність додаткового підсушування прес-матеріалу, що нагрівається у прес-формі. При цьому нагрівання до температури пресування T_{np} здійснюють без прикладання тиску для полегшення виходу вологи з полімеру. Прогрівання

прес-матеріалу у формі без прикладання тиску сприяє також видаленню летких продуктів часткової деструкції полімеру. Водночас, прикладання тиску за температури, нижчої T_{np} , покращує теплопередачу від стінок форми і при досягненні температури розм'ягчування приводить до зменшення товщини зразка, що пресується, значно прискорюючи його прогрів. Тому вибір температури, за якої прикладається тиск до прес-матеріалу, залежить від конкретних умов переробки, виду виробів, вимог щодо них та потребує окремої групи досліджень.

Тривалість витримки під тиском визначається необхідністю повного прогрівання прес-матеріалу і часом, який затрачається на його перетікання та надання кінцевої форми виробу. При прогріві полімеру до температури T_{np} час формування виробів найбільш складної конфігурації становить не більше 5 хв.

Температура зняття тиску і розпресування виробу наприкінці пресування визначається в основному тим, що полімерний виріб, перш ніж буде вилучений з форми, необхідно охолодити нижче температури склування T_c , в іншому випадку незатверділа заготовка неминуче буде пошкоджена. Однак, в деяких випадках тиск можна зняти чи зменшити і за більш високих температур, причому такий режим охолодження сприяє релаксації та зниженню внутрішніх напружень у виробі. Разом з тим, якщо тиск знімають за температури, вищої T_c , міцність виробу і точність його розмірів дещо знижуються, тому при підвищених вимогах до виробів, охолодження при переробці композиційного матеріалу марки графелон-20 повинно відбуватися під тиском і при зниженні температури до 250 °С.

Для зменшення тривалості циклу пресування необхідно цілеспрямовано підвищувати швидкість охолодження форм з готовим виробом. Застосування водяного охолодження дозволяє знижувати температуру стінок форми зі швидкістю ~100 °С/хв. При цьому, необхідно враховувати, що центральна частина особливо масивних виробів, охолоджується значно повільніше. Крім цього, досить швидке охолодження виробів може призвести до появи значних внутрішніх напружень і їхнє зсідання.

1.5. Властивості полімерного композиційного матеріалу (ПКМ). За комплексом фізико-механічних показників графелон перевищує більшість промислових пластмас.

1.5.1. Фізико-механічні властивості. У таблиці 2 наведені основні фізико-механічні показники зразків графелона-20, отриманих прямим пресуванням і литтям. Встановлено, що зразки, отримані прес-литтям, за ударною в'язкістю значно перевершують пресовані зразки. Як видно з таблиці, відносне видовження графелона-20 при розриві не перевищує за кімнатних температур 5–7 %, тоді як при стисненні деформація може бути значною: залежно від форми і розмірів, зразки можуть деформуватися без виникнення тріщин на 30–70 %. Відмітимо, що пластична деформація графелона-20 при стисненні за своєю природою є високо-еластичною. Співставлення великої жорсткості і твердості з високою ударною в'язкістю та здатністю до пластичних деформацій є значною перевагою графелона-20 порівняно з іншими пластмасами.

Таблиця 2

Фізико-механічні показники пресованих* і литих зразків графелона-20 та каучуку СКН-40**

Показник	Графелон-20*	Графелон-20**	Каучук СКН-40
Температура крихкості, °С	-80	-80	-23
Щільність, г/см ³	1,32	-	0,986
Міцність, МПа, при:			
– розтягу	80–90	140–175	29–32
– згині	150–180	200–220	–
– стиску	260–290	300–330	–
Модуль пружності, МПа, при:			
– стиску;	4–5	–	2–2,5
– згині	5,2–5,8	–	–
Відносне видовження при розриві, %	5–8	–	600–700
Ударна в'язкість, кДж/м ²	20–30	70–100	–
Теплостійкість за Віка, °С	290	290	–

Для заміни базового матеріалу накладок заспокоювача і натяжного башмака ланцюга (каучук СКН-40) газорозподільного механізму в роботах [2, 3] пропонується використати матеріал графелон-20, отриманого на основі ароматичного поліаміду, який є стійким до ударів та зносу під дією тертя, а також до високих температур (у межах 180–320 °С). Порівняльна характеристика фізико-механічних властивостей зазначених матеріалів наведена в таблиці 2 [4, 5].

Аналіз фізико-механічних характеристик цих матеріалів показав, що графелон-20 суттєво переважає за своїми фізико-механічними параметрами каучук СКН-40.

Міцність цього матеріалу залишається достатньо високою при значному нагріванні: так, границя текучості при стисненні при 250 °С для графелона-20 складає 100 МПа. Жорсткість і пластичність обумовлюють високу втомну міцність графелона-20. Це свідчить, що графелон-20 за втомною міцністю перевищує капролон в 1,5 рази ($2 \cdot 10^6$ циклів навантаження), а за числом циклів до руйнування при однаковому навантаженні – в декілька сотень разів. Графелон-20 також має незначну повзучість. Швидкість деформації залишається невисокою і при великих температурах (табл. 3).

Таблиця 3

Повзучість при стиску і відновленні графелона-20

Показник	Температура дослідження, °С		
	20	200	250
Повзучість за 100 год, %	0,56* 1,60**	0,68* 2,10**	1,35* 13,30**
Відновлення за 100 год, %	0,04* 0,13**	0,42* 0,45**	1,00* 5,61**

*напруження стиску – 10 МПа; **напруження стиску – 50 МПа.

Коефіцієнти лінійного розширення і теплопровідності графелона-20 в області температур експлуатації (від – 90 до 250 °С) є достатньо стабільними (табл. 4).

Таблиця 4

Залежність коефіцієнтів лінійного розширення і теплопровідності графелона-20 від температури

Показник	Температура дослідження, °С								
	50	75	100	125	150	175	200	225	250
Коефіцієнт лінійного розширення, $\cdot 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$	20,7	22,7	24,8	24,8	24,8	24,8	24,8	24,8	33,1
Коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К)	0,876	0,903	0,917	0,953	0,980	0,990	1,09	1,12	1,12

1.5.2. Триботехнічні властивості. Відмінними особливостями графелона-20 є висока зносостійкість за підвищених температур і навантажень, а також підвищена довговічність при роботі у мінеральних мастилах. Матеріал ефективно застосовується при питомому навантаженню до 5 МПа без мащення і 25 МПа зі змащуванням і швидкості ковзання до 3 м/с. Коефіцієнт тертя графелона-20 при роботі без мащення достатньо великий, однак його значення зберігається незмінним в широкому інтервалі температур. За зносостійкістю графелон в 2–10 разів переважає такі матеріали, як масляніт, АТМ-2, АМС-5, Ф4К20 [4, 5]. Триботехнічні дослідження графелона-20 у мастилі полігліколь «Орітес-210 ДС» показали, що найбільша зносостійкість має місце при ковзанні по поверхні нержавіючої сталі або бронзи. При ковзанні по поверхні вуглецевої сталі зносостійкість графелона-20 дещо зменшується, однак з підвищенням твердості вуглецевої сталі зносостійкість матеріалу наближається до зносостійкості при ковзанні по поверхні нержавіючої сталі.

Область термофрикційної працездатності матеріалу графелон-20 при навантаженні до 50 МПа знаходиться в межах 293–473 К, а при навантаженні до 20 МПа – 473–523 К.

Аналіз отриманих результатів трибологічних досліджень показав, що матеріал графелон-20 за зносостійкістю переважає матеріал каучук СКН-40 у 5,4 разу [2, 3].

1.5.3. Вологостійкість та хімічна стійкість. Графелон-20 практично не набухає і вироби з нього не змінюють розмірів при витримці в середовищі більшості вуглеводнів і інших органічних рідинах. Негативний вплив на графелон можуть здійснювати при підвищених температурах лише деякі полярні речовини типу нафтилу. Графелон-20 має задовільну стійкість до розбавлених мінеральних кислот та лугів. Однак концентровані кислоти і луги його руйнують і вплив цих реагентів підсилюється при підвищених температурах.

Графелон-20 при наявності в макромолекулах полімера амідних зв'язків здатний сорбувати вологу з повітря і поглинати воду при витримці у воді і водних розчинах. Вологопоглинання за одну годину при 373 К складає 0,3 %. Набухання графелона-20 у воді при температурі 295 К за 5000 годин не перевищує 3,1 %.

Отже, графелон-20, як і інші ароматичні й циклічні сполуки, має високу твердість, жорсткість і міцність, добрі антифрикційні властивості, пластичність і стійкість до ударних навантажень, високу втомну міцність, й забезпечує можливість широкого його застосування в різних галузях народного господарства.

Комплекс властивостей графелона-20 дозволяє використовувати його як конструкційний матеріал для роботи в широкому інтервалі температур. У багатьох випадках графелон-20 може використовуватись замість металів. Така заміна особливо важлива там, де необхідно знизити масу деталей, покращити їх антифрикційні властивості, забезпечити електроізоляцію, зменшити шум, полегшити отримання деталей складного профілю.

Наповнювачі-модифікатори. Асортимент наповнювачів графелона достатньо широкий: вуглецеві волокна, дисульфід молібдену, кокс, графіт, метали, оксиди і солі металів, полімерні та ультрадисперсні матеріали. Їх вплив на механічні властивості графелона досить значний. Введення наповнювача підвищує твердість, міцність на стиснення, модуль пружності, знижує міцність при згині і ударну в'язкість. Порошкоподібні наповнювачі зменшують міцність при розтягуванні графелона, ще більше падіння зазнає відносно подовження при розриві. Головною ж особливістю введення наповнювачів у матеріал є збільшення зносостійкості – залежно від виду і вмісту наповнювача зносостійкість композиту може значно зростати.

У кожному конкретному випадку важливо правильно вибрати концентрацію наповнювача для забезпечення тих або інших властивостей композиту. Об'ємний зміст наповнювача від 3 до 10 % забезпечує матеріалу високі міцність при розтягуванні і відносно подовження при розриві, хороший опір багатократному згину, низький вміст пор, але такі матеріали мають не дуже високий опір зносу. Об'ємний зміст наповнювача від 10 до 20 % дозволяє одержати зносостійкі матеріали для експлуатації при невисоких навантаженнях і швидкостях ковзання. Підвищений вміст наповнювача від 20 до 35 % забезпечує найбільш зносостійкість, стійкість до деформацій під навантаженням матеріалів, які можуть експлуатуватися при високих навантаженнях і швидкостях ковзання. У зв'язку з цим традиційно застосовували модифікатори, що воло-

діють властивостями «сухих» змашувальних матеріалів, – графіт, дисульфід молібдену, солі жирних кислот, кокс. Застосування таких традиційних антифрикційних наповнювачів у ряді випадків забезпечує досягнення необхідних службових характеристик і застосування композитів графелон у машинобудуванні. Істотного підвищення комплексу фізико-механічних і триботехнічних характеристик вдалося досягнути, використовуючи як наповнювачі дисперсні фрагменти вуглеграфітових волокон типу «Урал» і тканин типу УТМ-8, ТГН-2М та їх аналогів. У міру того, як форма часток наповнювача переходить від сферичної до волокно-подібної, наповнювач надає твердість композиції більшою мірою і починає сприймати все більшу частку навантаження. Як наповнювачі використовують волокна різних типів і конфігурацій – від окремих вусів або волокон до тканини. При введенні в полімер коротких дискретних волокон з високомодульних матеріалів механічне навантаження розподіляється між матрицею і наповнювачем, тому основні механічні властивості композиції поліпшуються в тій чи іншій мірі порівняно з властивостями матриці [4, 5].

Перспективним методом модифікації полімерів є використання як наповнювачів нетрадиційних компонентів – твердих речовин в ультрадисперсному стані. Ці речовини синтезують з використанням методів плазмо-механохімії і детонаційного синтезу. Через високу вартість і енергоємність методів отримання вони застосовувалися як модифікатори полімерів дуже обмежено. Проте використання ультрадисперсних з'єднань для модифікації полімерів забезпечує максимальну структурування полімерної матриці на різних рівнях структурної організації і отримання матеріалів з унікальними механічними, електричними, оптичними і іншими властивостями, часто недосяжними для традиційних композитів.

Ультрадисперсні сполуки (УДС) є перехідним станом конденсуючих речовин – макроскопічні ансамблі мікроскопічних частинок з розмірами $\sim 1\text{--}100$ нм. Основні фізичні властивості УДС значно відрізняються від властивостей матеріалів у звичайному стані. Системам з компонентами в ультрадисперсному стані властиві унікальні поєднання електричних, магнітних, теплових, механічних, сорбційних, радіопоглинаючих та інших властивостей, що не властиво у масивних кристалах. Поява подібних властивостей пов'язана з розмірними ефектами УДС. Ці ефекти реалізуються, коли розмір частинок стає співвимірним з характерним кореляційним масштабом того або іншого фізичного явища (наприклад, розміру домена) або характерною довжиною будь-якого процесу перенесення (довжина вільного пробігу електронів та інших елементарних частинок) [8].

1.7. Структурна організація ПКМ. Ароматичний поліамід фенілон при температурах до $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ має аморфну структуру, після цього розм'ягчується і в інтервалі температур $340\text{--}360\text{ }^{\circ}\text{C}$ швидко кристалізується, плавиться при температурі $430\text{ }^{\circ}\text{C}$. Мезоструктура це перехідна зона в області контакту «полімер–наповнювач». Різноманіття наповнювачів-модифікаторів, матриць, схем армування, використовуваних при створенні композиційних матеріалів, дає можливість направлено регулювати міцність, жорсткість, рівень робочих температур і інші властивості шляхом підбору складу, зміни співвідношення компонентів і макроструктури композитів. Так, в роботі [9] представлені результати досліджень впливу металовмісних вуглецевих волокон (Me–ВВ) на структуру та механічні властивості вуглепластиків на основі термостійкого ароматичного поліаміду фенілон С-2. Показано, що використання Me–ВВ забезпечує, в порівнянні з вихідним полімером, підвищення міцності на 10 %, що пояснюється впливом вуглецевих волокон, активованих наночастками металу, на структуру полімерної матриці. В спектрах композитів, наповнених Me–ВВ, виявлені суттєві зміни в смугах поглинання, які належать до коливань амідних груп, що свідчить про суттєвий вплив наповнювача на структуру полімеру і про те, що цей вплив відбувається саме через амідні фрагменти. Рішення таких завдань передбачає прогнозування властивостей матеріалу і діагностики його стану [5, 6]. Питання якості та надійності матеріалів, виробів і конструкцій з них є однією з найбільш актуальних проблем сучасного науково-технічного розвитку.

Сконструйовано пристрій для склеювання виготовленої пластинки з металевою основою заспокоювача і натяжного башмака (рис. 2). Склеювання виготовленої пластинки з металевою основою виконували за допомогою спеціального металевого клею «Мекладин» [10].

Підготовка поверхні деталей для склеювання металевими клеями принципово не відрізняється від підготовки для склеювання звичайним клеєм. Поверхню слід промити спиртом або сумішшю спирту з петролейним ефіром у співвідношенні 1:1, потім деталь необхідно просушити в термостаті за температури $40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Перед нанесенням клею поверхні змочують краплею рідкого галію, який наносять вольфрамівим стрижнем. Вольфрам достатньо твердий і добре змочується галієм, через це вольфрамове вістря легко прориває окисну плівку на металі та інших поверхнях. Оксидну плівку можна видалити й іншими способами, наприклад, хімічним, але обов'язково в присутності рідкого галію. Клей наносять невеликою лопаткою з фторопласту на деталь, підігріту до температури $35\text{--}37\text{ }^{\circ}\text{C}$, та притирають з поверхнею, щоб він утворив конус з іншими поверхнями. Полімерну пластинку склеюють з металевою основою, нагрітою до тієї самої температури, і притирають їх одна до одної, щоб клей повністю заповнив зазор між деталями. Потім деталь затискають у спеціальному пристрої (рис. 2) і витримують на повітрі при кімнатній температурі протягом 24 годин, або піддають термообробці при температурі $120\text{--}140\text{ }^{\circ}\text{C}$ протягом 6–8 год.

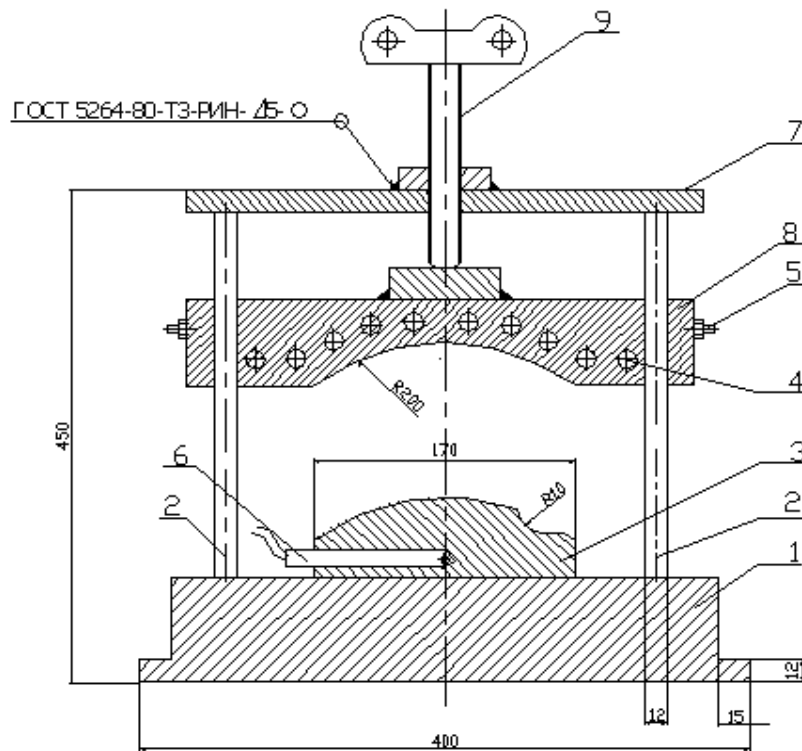


Рис. 2. Пристрій для наклеювання пластинки із графелона-20:

- 1 – нижня нерухома плита; 2 – напрямні;
- 3 – місце для кріплення заспокоювача ланцюга;
- 4 – клеми для під'єднання нагрівального елемента;
- 5, 6 – термопари; 7 – верхня нерухома плита;
- 8 – верхня рухома плита; 9 – затяжний гвинт

В останньому випадку деталь після приклеювання охолоджують до кімнатної температури. Металевий клей «Мекладин» може експлуатуватись тривалий термін – до п'яти років. Цим клеєм можна склеювати різні деталі, які працюють у воді та мастилі.

Висновки

Розроблена структурно-технологічна модель процесу формування складу, структури і властивостей полімерного композиційного матеріалу графелон на базі якої запропонована технологія виготовлення лабораторних зразків, пластин заспокоювача і натяжного башмака ланцюга газорозподільного механізму двигуна внутрішнього згорання.

Сконструйовано пристрій для склеювання виготовленої пластинки матеріалу графелон-20 з металеву основою заспокоювача і натяжного башмака ланцюга газорозподільного механізму двигуна внутрішнього згорання.

Результати виконаних досліджень можуть бути використанні для виготовлення заспокоювача і натяжного башмака ланцюга газорозподільного механізму таких автомобілів, як Mercedes-Benz W220, Volkswagen, Skoda, Seat з двигуном 1,8 TFSI 118 кВт, Nissan Note з двигуном 1,4 CR 14DE, Toyota Corolla 150 з двигуном 1ZZ, Nissan Almera з двигуном 1,5 Q615DE, Niva-Chevrolet: 2123-1006019.

Література

1. Карагодин В. И. Ремонт автомобилей и двигателей : учеб. пособ. [для студ. проф. учеб. заведений] / В. И. Карагодин, Н. Н. Митрохин. – 2-е изд., стер. – М. : ИЦ «Академия», 2003. – 496 с.
2. Свідерський В. П. Підвищення зносостійкості і розробка технології виготовлення заспокоювача ланцюга газорозподільного механізму двигуна внутрішнього згорання / В. П. Свідерський, В. С. Яремчук // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2018. – № 2. – С. 39–45.
3. Свідерський В. П. Підвищення зносостійкості натяжного башмака газорозподільного механізму автомобіля ВАЗ-21011 / В. П. Свідерський, Л. П. Мельничук, В. С. Нараєвський // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2009. – № 5. – С. 51–55.
4. Антифрикционные термостойкие полимеры / Г. А. Сиренко, В. П. Свидерский, В. Д. Герасимов, В. З. Никонов. – Київ : Техніка, 1978. – 246 с.
5. Сиренко Г. А. Антифрикционные карбопластики / Г. А. Сиренко. – Киев : Техника, 1985. – 195 с.
6. Термостойкие ароматические полиамиды / Л. Б. Соколов, В. Д. Герасимов, В. М. Савинов, В. К. Беляков. – М. : Химия, 1975. – 256 с.
7. Межгосударственный стандарт ГОСТ 33519–2015. Композиты полимерные. Метод испытаний на

сжатие при нормальной, повышенной и пониженной температурах. – М. : Стандартинформ, 2016. – 32 с.

8. Охлопкова А. А. Модификация полимеров ультрадисперсными соединениями / А. А. Охлопкова, О. А. Адрианова, С. Н. Попов. – Якутск : ЯФ Издательство СО РАН. – 2003. – 247 с.

9. Буря А. И. Структура и механические свойства углепластиков на основе фенилона С-2, армированных металлосодержащими углеродными волокнами / А. И. Буря, А. М. Сафонова, Л. А. Губачева // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля. – 2013. – № 9 (198), ч. 1. – С. 1–6.

10. Кардашов Д. А. Синтетические клеи / Д. А. Карташов. – М. : Химия, 1976. – 502 с.

References

1. Karagodin V. I. Remont avtomobilej i dvigatelej : ucheb. posob. [dlya stud. prof. ucheb. zave-denij] / V. I. Karagodin, N. N. Mitrohin. – 2-e izd., ster. – М. : ІС «Akademiya», 2003. – 496 s.

2. Sviderskyi V. P. Pidvyshchennia znosostiikosti i rozrobka tekhnologii vyhotovlennia zaspokoiuvacha lantsiuha hazorozpodilnoho mekhanizmu dvyhuna vnutrishnoho zghorannia / V. P. Sviderskyi, V. S. Yaremchuk // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2018. – № 2. – S. 39–45.

3. Sviderskyi V. P. Pidvyshchennia znosostiikosti natiazhnoho bashmaka hazorozpodilchoho mekhanizmu avtomobilia VAZ-21011 / V. P. Sviderskyi, L. P. Melnychuk, V. S. Naraievskyi // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2009. – № 5. – S. 51–55.

4. Antifrikcionnye termostojkie polimery / G. A. Sirenko, V. P. Sviderskij, V. D. Gerasimov, V. Z. Nikonov. – Kiyiv : Tehnika, 1978. – 246 s.

5. Sirenko G. A. Antifrikcionnye karboplastiki / G. A. Sirenko. – Kiev : Tehnika, 1985. – 195 s.

6. Termostojkie aromaticheskie poliamidy / L. B. Sokolov, V. D. Gerasimov, V. M. Savinov, V. K. Be-lyakov. – М. : Himiya, 1975. – 256 s.

7. Mezhgosudarstvennyj standart GOST 33519–2015. Kompozity polimernye. Metod ispytanij na szhatie pri normalnoj, povyshennoj i ponizhennoj temperaturah. – М. : Standartinform, 2016. – 32 s.

8. Ohlopkova A. A. Modifikaciya polimerov ultradispersnymi soedineniyami / A. A. Ohlopkova, O. A. Adrianova, S. N. Popov. – Yakutsk : YaF Izdatelstvo SO RAN. – 2003. – 247 s.

9. Burya A. I. Struktura i mehanicheskie svojstva ugleplastikov na osnove fenilona S-2, armiro-vannyh metallosoderzhashimi uglerodnymi voloknami / A. I. Burya, A. M. Safonova, L. A. Gubacheva // Visnik Shidnoukrayinskogo nacionalnogo universitetu im. Volodimira Dalya. – 2013. – № 9 (198), ch. 1. – S. 1–6.

10. Kardashov D. A. Sinteticheskie klei / D. A. Kartashov. – М. : Himiya, 1976. – 502 s.

Рецензія/Peer review : 25.5.2019 р.

Надрукована/Printed : 1.6.2019 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Каплун В. Г.

М.П. СВИТА
ТОВ "НВФ "ПРОБА", Київ
Н.М. ЗАЩЕПКИНА

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

РОЗРОБКА ЄМНІСНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ДЛЯ КРИЛЬЧАТИХ ВИМІРЮВАЧІВ ШВИДКОСТІ ТА ВИТРАТОМІРІВ ГАЗІВ

В роботі запропонована конструкція ємнісного перетворювача для крильчатих вимірювачів швидкості газових потоків та витратомірів газів на їх основі. Розроблено діючий макет зонду з ємнісним перетворювачем кутової швидкості обертання крильчатки в електричний імпульсний сигнал. Частота вихідного імпульсного сигналу зонду пропорційна швидкості газового потоку в робочому температурному діапазоні від -40 до +350 °С, що дозволяє використовувати даний зонд при високотемпературних технологічних та екологічних вимірюваннях. Наведені структурна та електрична принципова схеми ємнісного перетворювача та описаний принцип його роботи. Знята залежність ємності зонду від температури в діапазоні від 20 до 350 °С та апробовано зонд в аеродинамічній трубі «Проба-25». Проведено вимірювання чутливості крильчатки та знято характеристику залежності частоти на виході зонду від швидкості повітряного потоку в аеродинамічній трубі. Перевірена працездатність зонду при максимальній робочій температурі.

Ключові слова: ємнісний перетворювач, швидкість потоку, газовий потік, витратомір газу, анемометр, зонд, крильчатка.

M.P. SVYTA
LLC "RPC "PROBA"
N.M. ZASHCHEPKINA

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

DEVELOPMENT OF A CAPACITIVE TRANSDUCER FOR WING VELOCITY METERS AND GAS FLOWMETERS

In the paper, the design of a capacitive converter for winged gas flow meters and gas flow meters based on them is proposed. The principle of operation of a wing meter is based on the conversion of the rate of gas flow into the angular velocity of the impeller - a speed sensor. An active model of the probe with a capacitive converter of the angular velocity of the impeller in an electric pulse signal was developed. The frequency of the output pulse signal of the probe is proportional to the velocity of the gas stream in the operating temperature range from -40 to +350 °C, which allows the use of this probe at high-temperature technological and environmental measurements. The probe is a bar, with one end of which there is a measuring head, and with another handle. The impeller axis is fixed in the metal body of the head of the probe, which protects the impeller from mechanical damage. In the probe handle is an electronic plate maker. The charger generates an electrical impulse with each passing of the wing of the impeller over the base of the base capacitance. The impeller has four blades, so we have four pulses per rotating impeller. The article presents the structural and electrical principle schemes of the capacitive converter and describes the principle of its operation. The formulas for calculating the equivalent inductance for setting the generator operating point at the front of the band filter are given. For stable operation of the generator in a wide temperature range, it is proposed to use automatic frequency adjustment. In the experimental parts, the dependence of the probe's capacity on the temperature in the range from 20 to 350 °C was removed and the probe tested in the "Proba-25" aerodynamic tube. Measured the sensitivity of the impeller and the characteristics of the dependence of the frequency on the output of the probe on the air flow velocity in the aerodynamic tube have been taken. The dependence of the frequency at the output of the generator board on the flow rate of the gas is linear in the range from 4 to 20 m/s. The speed of the gas flow at the output of the moldboard is calculated. The calculations indicate rather high accuracy of the angular velocity of the impeller to the frequency of electrical oscillations. The calculated value of the relative error of measurement of the air flow rate does not exceed 2% in the range of speeds from 2 to 25 m/s. Proven operating efficiency at maximum operating temperature.

Key words: capacitance converter, flow rate, gas flow, gas flow meter, anemometer, probe, impeller.

Вступ

Крильчаті вимірювачі швидкості направлених потоків газів (анемометри) та витратоміри на їх основі знайшли широке коло застосувань в різних галузях завдяки простоті їх використання та високій точності вимірювання. Принцип дії крильчатого вимірювача оснований на перетворенні швидкості газового потоку в кутову швидкість крильчатки – датчика швидкості [1]. Крильчаті вимірювачі поділяють на портативні та стаціонарні. Портативні використовують при налагодженні систем кондиціонування, перевірки димоходів та вентиляційних каналів, вимірювання витрати викидів газів від стаціонарних джерел забруднення атмосфери та ін. Стаціонарні прилади використовують для неперервного вимірювання швидкості та витрати газів при технологічних вимірюваннях.

Витрата газу може бути виражена в об'ємних та масових одиницях. Формула для розрахунку об'ємної витрати за допомогою вимірювача швидкості газового потоку має вигляд (1) [2]:

$$Q = K_y \cdot V \cdot S, \quad (1)$$

де Q – об'ємна витрата (в робочих умовах), [м³/с]; K_y – відношення середньої швидкості газового потоку в даному перерізі до швидкості потоку в точці вимірювання; V – місцева швидкість газового потоку в точці вимірювання, [м/с]; S – площа вимірювального перетину газоходу, [м²].

Формула для розрахунку масової витрати за допомогою вимірювача швидкості газового потоку має вигляд (2) [3]:

$$Q_m = Q \cdot \rho \cdot 3600, \quad (2)$$

де Q_m – масова витрата, [кг/год]; Q – об'ємна витрата (в робочих умовах), [м³/с];
 ρ – щільність газу (в робочих умовах), [кг/м³].

Для перетворення кутової швидкості обертання крильчатки в частоту електричних коливань застосовують такі принципи: оптичні, магнітні, індуктивні, ємнісні [4]. На даний час серійно випускаються конструктивно закінчені оптичні, магнітні, індуктивні, ємнісні датчики, але всі вони мають малий діапазон робочих температур та великі розміри [5]. Це суттєво обмежує їх використання в вимірювачах швидкості та витратомірах газів.

Крильчаті портативні вимірювачі виготовляють такі виробники: Testo AG, Kimo instruments, Uni-T, та ін., але їх робочий температурний діапазон від -20 до +70 °С. Компанія «Höntzsch GmbH» виробляє портативні (серія «flowtherm NT») та стаціонарні (серія ZS) крильчаті прилади з розширеним діапазоном робочих температур від -40 до +550 °С та діапазоном вимірювання швидкості газового потоку від 0,4 до 120 м/с. Фірма «Höntzsch GmbH» використовує безконтактний індуктивний метод перетворення кутової швидкості крильчатки [6].

Постановка проблеми

Вимірювання швидкості та об'ємної витрати димових, технологічних газів може відбуватись в широких температурних діапазонах. Ця умова звужує кількість датчиків, що серійно випускаються для таких вимірювань.

Таким чином, запропоновано розробити діючий макет зонду з ємнісним перетворювачем кутової швидкості обертання крильчатки в електричний імпульсний сигнал.

Частота вихідного імпульсного сигналу повинна бути пропорційною швидкості газового потоку в робочому температурному діапазоні від -40 до +350 °С, що дозволить використовувати даний пристрій при високотемпературних технологічних та екологічних вимірюваннях.

Результати роботи

Було виготовлено зонд пристрою довжиною 1 метр, який показано на рис. 1.



Рис. 1. Фото зонду вимірювача швидкості та витрати газів

Зонд представляє собою штангу, з одного кінця якої знаходиться вимірювальна голівка, а з іншого ручки. Вісь крильчатки закріплена в металевому корпусі голівки зонду, який захищає крильчатку від механічних пошкоджень.

Голівка показана на рис 2 б, вона складається з корпусу, базової ємності та двох шпиль між якими кріпиться крильчатка. Голівка та штанга виготовлені зі сталі 12Х18Н10Т. Поперечний переріз та фото голівки і крильчатки показані на рис. 2 а, б, в.

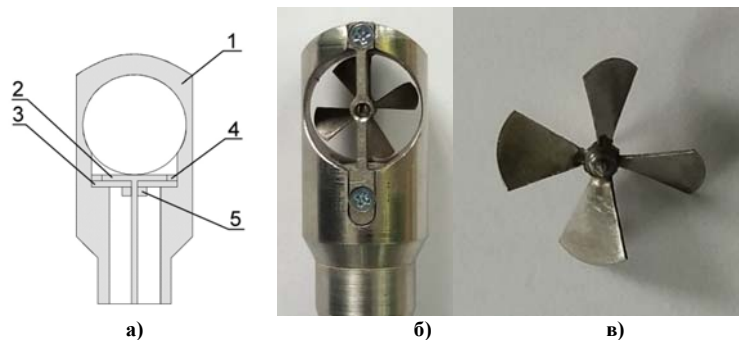


Рис. 2. а) поперечний переріз голівки. 1 – корпус, 2 – обкладка базової ємності, 3 – слюдяний діелектрик, 4 – герметик, 5 – гайка, б) голівка в сборі, в) крильчатка

Крильчатка складається з вісі, пропелера та двох втулок. Пропелер запресований по центру вісі за допомогою втулок.

Базова ємність утворена між обкладкою базової ємності і корпусом голівки (див. рис. 2 а). Для збільшення чутливості обкладка базової ємності встановлена таким чином, щоб відстань від неї до лопасті крильчатки була не більше 1 мм. Між базовою ємністю та платою формувача протягнутий провід для передачі зміни ємності.

У ручці зонду розташована електронна плата формувача. Плата формувача генерує електричний імпульс при кожному проходженні крила крильчатки над обкладкою базової ємності. Крильчатка має чотири лопасті, тому на один оберт крильчатки маємо чотири імпульси.

Структурна схема ємнісного перетворювача кутової швидкості обертання крильчатки в частоту електричних коливань наведена на рис. 3.

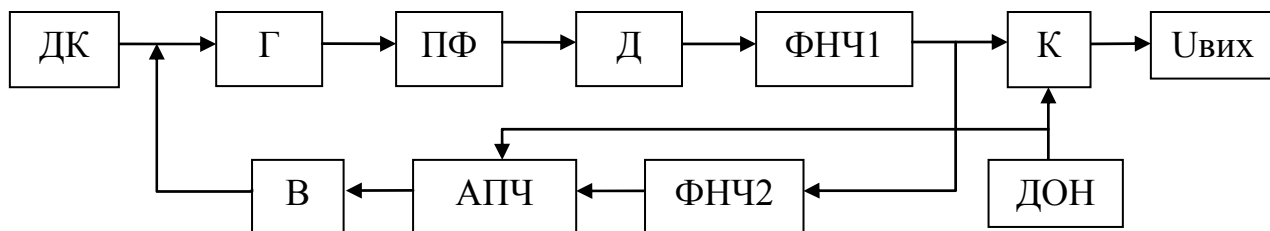


Рис. 3. Структурна схема смісного перетворювача кутової швидкості обертання крильчатки в частоту електричних коливань: ДК – датчик крильчатки, Г – генератор, ПФ – полосовий фільтр, Д – детектор, ФНЧ1 – фільтр нижніх частот 1, К – компаратор, ДОН – джерело опорної напруги, ФНЧ2 – фільтр нижніх частот 2, АПЧ – автопідстройка частоти, В – варикап, Увих – вихідна напруга (прямокутні імпульси з частотою пропорційною кутовій швидкості обертання крильчатки)

Генератор (Г) генерує гармонічні коливання, частота яких залежить від резонансного LC-контура в який входить смінь зонду. При проходженні крила крильчатки над обкладкою базової смності та віддаленні від неї змінюються параметри LC-контура та змінюється частота генератора на Δf , таким чином відбувається частотна модуляція швидкості обертання крильчатки. Перехід від частотної до амплітудної модуляції відбувається в полосовому фільтрі (ПФ) з центральною частотою 10,7 МГц. Робоча точка знаходиться на фронті характеристики ПФ. Застосований ПФ (SFE10.7MS3) має дуже круту амплітудно-частотну характеристику, вона показана на рис. 4. Зміна входної частоти на Δf призводить до зміни амплітуди вихідної частоти ПФ, таким чином отримуємо амплітудно модульовану швидкість обертання крильчатки. Детектор (Д) разом з фільтром низьких частот (ФНЧ1) перетворює високочастотні коливання в низькочастотні навколо напруги рівній джерелу опорної напруги (ДОН). Компаратор (К) з гістерезисом зрівнює напруги між ДОН та виходом ФНЧ1, таким чином К формує прямокутні імпульси, пропорційні кутовій швидкості обертання крильчатки. Для утримання робочої точки при змінах температури в схемі присутня автоматична підстройка частоти (АПЧ). АПЧ відстежує зміни входної напруги та намагається тримати її на рівні напруги ДОН завдяки варикапу (В).

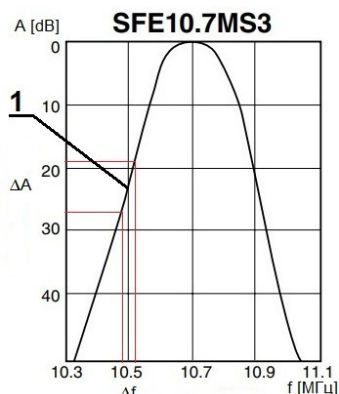


Рис. 4. Амплітудно-частотна характеристика ПФ. 1 – робоча точка

Електрична принципова схема формувача представлена на рис. 5.

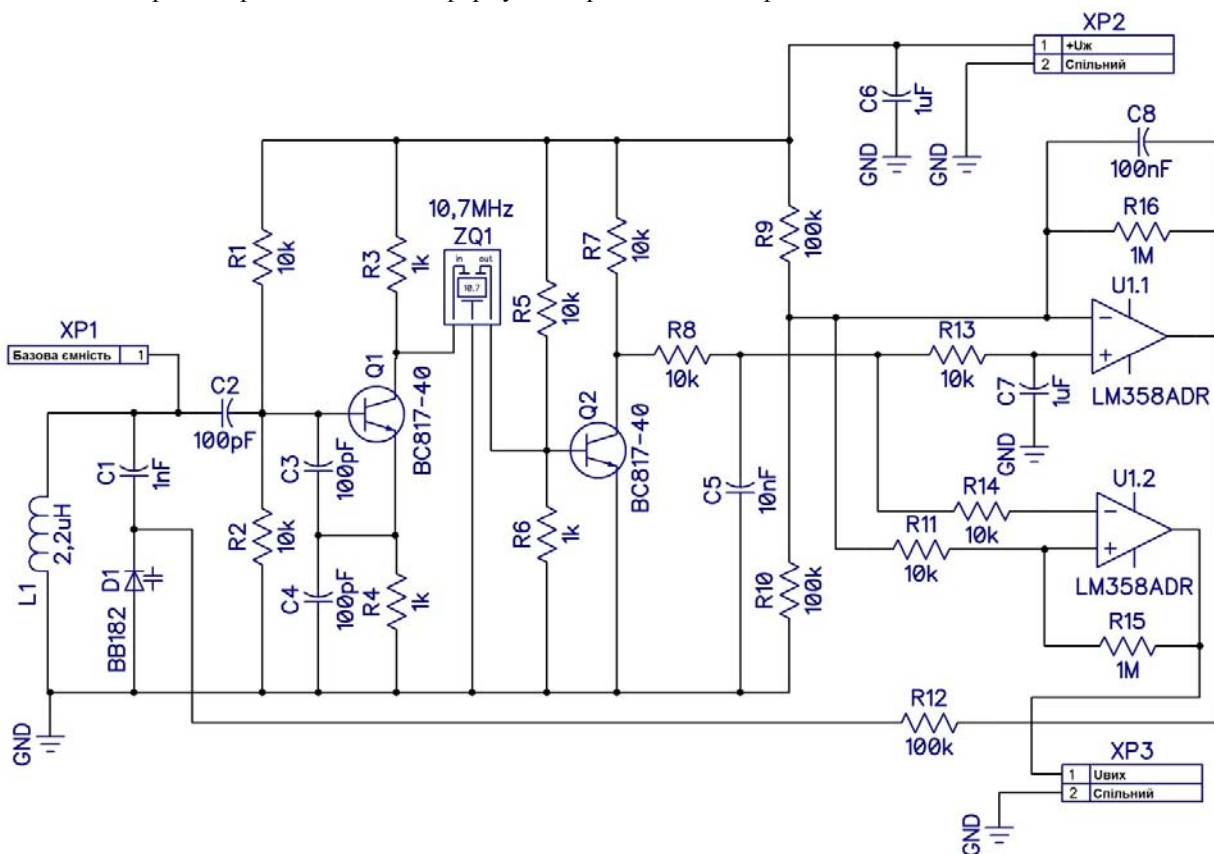


Рис. 5. Електрична принципова схема формувача

Напруга живлення схеми дорівнює 5 В та подається на роз'єм XP2. До роз'єму XP1 під'єднується

зонд. Генератор зібраний за схемою ємнісна трьохточка на елементах (C1-C4, L1, R1-R4, D1, Q1) з можливістю керування ним за допомогою напруги поданої на варикап. Частота генератора повинна бути близькою до центральної робочої частоти полосового фільтра – 10,7 МГц, вона розраховується за формулою Томсона (3) [7]:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_e C_e}} \quad (3)$$

де f – частота генератора, [Гц]; L_e – еквівалентна індуктивність, [Гн]; C_e – еквівалентна ємність, [Ф].

Еквівалентна ємність та еквівалентна індуктивність доволі складні для розрахунку параметри схеми, тому що зонд має свої значення ємності та індуктивності. Радіо елементи мають певні допуски ще й в схемі присутній нелінійний елемент – варикап. Для спрощення розрахунків виміряємо значення ємності зібраного зонду і приймемо її за еквівалентну. Ємність зібраного зонду виміряна приладом UNI-T UT2004 становить 98 пФ при температурі 20 °С.

Перетворимо формулу (3) в формулу (4) для знаходження значення індуктивності L_1 резонансного LC-контурю:

$$L_1 = \frac{\left(\frac{1}{2\pi f}\right)^2}{C_e} \quad (4)$$

Для нашого випадку: $f=10,7$ МГц, $C=98$ пФ, розрахована $L=2,26$ мкГн, найближче значення із ряду номіналів E24 дорівнює 2,2. $L_2=2,2$ мкГн, допуск $\pm 10\%$. Полосовий фільтр ZQ1 (SFE10.7MS3) [8]. Детектор зібраний на елементах (R5-R7, Q2). ФНЧ1 – зібраний на елементах (R8, C5), він має частоту зрізу близько 10 кГц. Компаратор (К) зібраний на (U1.2, R11, R14, R15), ширина зони гістерезису К при номіналах зазначених на схемі рис. 5, становить 50 мВ. Джерело опорної напруги організовано на дільнику (R9, R10) з коефіцієнтом 0,5 та становить 2,5 В. Вихідна напруга схеми формувача з частотою пропорційною швидкості обертання крильчатки знімається з роз'єму ХР3. Дана напруга зручна для інтеграції з цифровими вимірвальними системами, тому що має логічний рівень 5 В.

Експериментальна частина

Було отримано залежність ємності зонду від температури в діапазоні від 20 до 350 °С в печі, яка представлена на рис. 6.

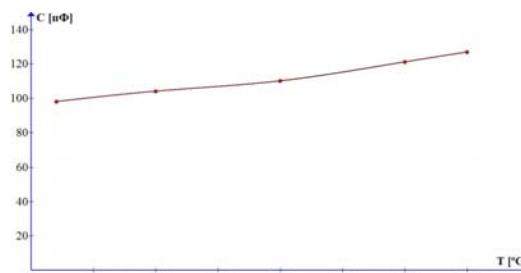


Рис. 6. Залежність ємності зонду від температури

Згідно з графіком ємність змінюється від 98 до 127 пФ в діапазоні температур від 20 до 350 °С. Варикап ВВ182, який застосований в схемі формувача, здатен зкомпенсувати зміну ємності при напрузі керування ним від 0,5 до 5 В на 45 пФ [9]. Даної перестройки по ємності буде достатньо для підстройки частоти генератора та утримання робочої точки в зазначеному температурному діапазоні.

Зонд було апробовано в аеродинамічній трубі (АТ) «Проба-25», що належить ТОВ «НВФ «ПРОБА». Основні технічні характеристики АТ «Проба-25» показані в табл. 1.

Таблиця 1

Технічні характеристики АТ «Проба-25»

Діапазон відтворення швидкості повітря, [м/с]	0,1-25
Абсолютна похибка, [м/с]	$\pm(0,05+0,015 \cdot V)$, де V – чисельне значення швидкості повітряного потоку, виражене в метрах за секунду.
Діаметр робочого перетину, [мм]	300

Чутливість крильчатки була виміряна наступним чином: зонд був закріплений в АТ таким чином, щоб голівка зонду розташовувалася в центральній частині робочого перетину АТ. Повздовжня вісь зонда була перпендикулярна до поздовжньої вісі АТ, а вісь крильчатки паралельна до поздовжньої вісі АТ. Швидкість повітря при якій крильчатка почала стійко обертатись становила 0,52 м/с.

Також було знято характеристику залежності середнього значення частоти на виході плати формувача від швидкості повітря в АТ за допомогою частотоміру АТТЕН F1000С, що показано на рис. 7.

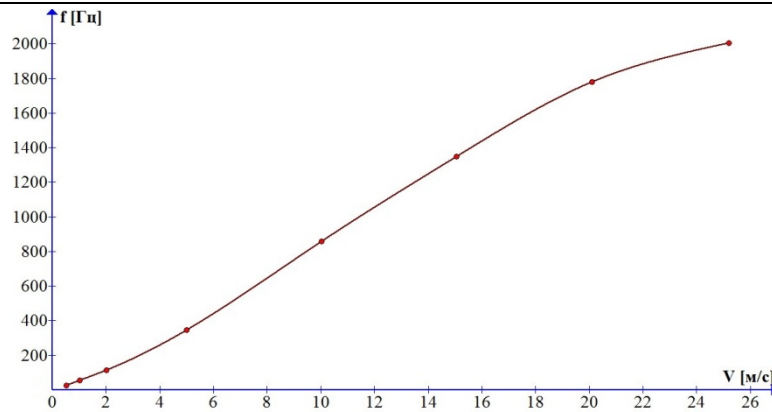


Рис. 7. Характеристика залежності частоти імпульсів на виході плати формувача від швидкості потоку повітря в АТ

Отримана характеристика, девіація частоти та розраховані дані зведені в табл. 2. Роздільна здатність показує значення швидкості в кожному імпульсі на виході плати формувача. Розрахована швидкість показує реальне значення, яке могло б бути отримане вимірювальною системою.

Для деяких прецизійних використань при виготовленні витратомірів буде недостатньо даної роздільної здатності, але її можна легко збільшити. Оскільки, частота це кількість імпульсів за одну секунду, то рахунок імпульсів можна вести, наприклад, за дві секунди, при такому підході роздільна здатність збільшиться вдвічі.

Використаний частотомір має низьку інерційність при вимірюванні частоти, тому девіація має великі значення. Зменшити девіацію можна застосувавши програмний цифровий фільтр низьких частот при реалізації вимірювальної системи. Працездатність зонду була перевірена при максимальній робочій температурі зонду 350 °С за допомогою будівельного фену.

Таблиця 2

Залежність частоти на виході плати формувача від швидкості потоку повітря в АТ

Швидкість потоку в АТ, [м/с]	0,52	1,01	2,01	5,00	10,03	15,05	20,1	25,2
Середня частота на виході плати формувача, [Гц]	27	55	115	346	861	1353	1782	2005
Девіація частоти, [Гц]	±1	±2	±2	±4	±9	±16	±24	±34
Роздільна здатність зонду, [м/с*імпульс]	0,019	0,018	0,017	0,014	0,012	0,011	0,011	0,013
Розрахована швидкість на виході зонду, [м/с]	0,52 ±0,019	1,01 ±0,036	2,01 ±0,034	5,00 ±0,056	10,03 ±0,108	15,05 ±0,176	20,1 ±0,264	25,2 ±0,442
Відносна похибка, [±%]	3,7	3,6	1,7	1,1	1,1	1,2	1,3	1,8

Висновки

Розроблена електронна схема ємнісного перетворювача дозволяє перетворювати кутову швидкість крильчатки зонду в частоту електричних коливань, приведену до стандартного цифрового логічного рівня 5В. Виконано вимірювання залежності ємності зонду від температури, залежність показує, що зонд змінює свою ємність в діапазоні температур від 20 до 350 °С на 29 пФ. Дану зміну ємності, в залежності від температури, схема формувача здатна зкомпенсувати за допомогою використаного варикапу ВВ182.

Залежність частоти на виході плати формувача від швидкості газового потоку має лінійний характер в діапазоні від 4 до 20 м/с.

Розрахована швидкість газового потоку на виході плати формувача свідчить про достатньо високу точність перетворення кутової швидкості крильчатки в частоту електричних коливань. Розраховане значення відносної похибки вимірювання швидкості потоку повітря не перевищує 2% в діапазоні швидкостей від 2 до 25 м/с.

Література

1. Кулебякин В.В. Методы и приборы для измерения расхода жидкостей и газов : учебнометодическое пособие / Кулебякин В.В. – Минск : БНТУ, 2017.
2. ГОСТ 8.361-79. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Расход жидкости и газа. Методика выполнения измерений по скорости в одной точке сечения трубы. Государственный стандарт союза ССР. – [Дата введения с 01.07.1980 г.].
3. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества веществ : Справочник : Кн. 1. – 5-е изд. перераб. и доп. – СПб : Политехника, 2002. – 409 с.
4. Методы и средства измерений, испытаний и контроля : учебное пособие. В 5 ч. / А.Г. Дивин, С.В. Пономарев, Г.В. Мозгова. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. – Ч. 2. – 108 с.

5. Коснырев В. Датчики компании KLASCHKA / В. Коснырев // Chip news. – 2007. – № 4(117). – С. 16–26.
6. Vane wheel flow sensor ZS25 with optional integrated transducer UFA. Höntzsch GmbH. URL: www.hoentzsch.com
7. Элементарный учебник физики : учеб. пособие : в 3 т. Т. 3. Колебания и волны. Оптика. Атомная и ядерная физика / под ред. Г.С. Ландсберга. – 13-е изд. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 656 с.
8. Data sheet: Piezo filters Ceramic filters low loss, wide or narrow band, Miniature SFE MA/MTE/MVE/MFP 10.7MHz. URL: www.murata.com
9. Product data sheet: BB182 VHF variable capacitance diode. rev.-03 24 february 2009. URL: www.nxp.com

References

1. Kulebyakin V.V. Metody i pribory dlya izmereniya rashoda zhidkostej i gazov : uchebnometodicheskoe posobie / Kulebyakin V.V. – Minsk : BNTU, 2017.
2. GOST 8.361-79. Gosudarstvennaya sistema obespecheniya edinstva izmerenij (GSI). Rashod zhidkosti i gaza. Metodika vypolneniya izmerenij po skorosti v odnoj tochke secheniya truby. Gosudarstvennyj standart soyuza SSR. – [Data vvedeniya s 01.07.1980 g.].
3. Kremlevskij P.P. Rashodomery i schetchiki kolichestva veshestv : Spravochnik : Kn. 1. – 5-e izd. pererab. i dop. – SPb : Politehnika, 2002. – 409 s.
4. Metody i sredstva izmerenij, ispytaniy i kontrolya : uchebnoe posobie. V 5 ch. / A.G. Divin, S.V. Ponomarev, G.V. Mozgova. – Tambov : Izd-vo FGBOU VPO «TGTU», 2012. – Ch. 2. – 108 s.
5. Kosnyrev V. Datchiki kompanii KLASCHKA / V. Kosnyrev // Chip news. – 2007. – № 4(117). – С. 16–26.
6. Vane wheel flow sensor ZS25 with optional integrated transducer UFA. Hontzsch GmbH. URL: www.hoentzsch.com
7. Elementarnyj uchebnik fiziki : ucheb. posobie : v 3 t. Т. 3. Kolebaniya i volny. Optika. Atomnaya i yadernaya fizika / pod red. G.S. Landsberga. – 13-e izd. – М. : FIZMATLIT, 2009. – 656 s.
8. Data sheet: Piezo filters Ceramic filters low loss, wide or narrow band, Miniature SFE MA/MTE/MVE/MFP 10.7MHz. URL: www.murata.com
9. Product data sheet: BB182 VHF variable capacitance diode. rev.-03 24 february 2009. URL: www.nxp.com

Рецензія/Peer review : 15.5.2019 р.

Надрукована/Printed : 1.6.2019 р.
Рецензент: д.т.н., проф. В.Г. Здоренко

В.Д. КОСЕНКОВ

Хмельницький національний університет

Д.А. ІВЛЕВ, В.В. БУЛГАР, С.М. ОГІНСЬКА, Т.М. МОСПАН

Одеський національний політехнічний університет

КОРЕГУВАННЯ МЕТОДИКИ ПРОЕКТУВАННЯ ГЕНЕРАТОРА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ З БЕЗОБМОТКОВИМ РОТОРОМ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Сьогодні ринок найбільш популярних вітроенергетичних установок (ВЕУ) малої потужності 1–5 кВт поділяється на два нерівнозначні сегменти: великий сегмент дешевих, але енергонеефективних високооберткових ВЕУ, розрахованих на номінальну швидкість вітру 10–12 м/с; малий сегмент енергоефективних, але дорогих низькооберткових ВЕУ, розрахованих на номінальну швидкість вітру 8–9 м/с. Вартість низькооберткової ВЕУ в середньому в 3–4 рази вище вартості високооберткової ВЕУ однієї й тієї ж потужності, що багато в чому обумовлено вартістю постійних магнітів. Експериментальний зразок низькооберткового енергонеефективного генератора постійного струму з безобмотковим ротором і електромагнітним збудженням коштує в 2,2 рази дешевше серійного аналога. Загальна вартість установки стає порівнянною з вартістю високооберткових установок. Методика проектування даного генератора базувалася на теоретичному аналізі магнітних і теплових моделей. Результати фізичних випробувань експериментального зразка дозволили внести в його методику проектування ряд доповнень і уточнень. Теплові випробування підтвердили правильність вибору значень електромагнітних навантажень. Експеримент показав, що дана конструкція здатна витримувати 5-кратне перевантаження по струму без додаткових полюсів і компенсаційної обмотки. Отримані результати експерименту дозволили уточнити методику проектування й виробити додаткові рекомендації із проектування даного генератора: вибирати число полюсів, враховуючи величину частоти перемагнічування в центральному статорі; прийняти величину полюсного перекриття рівною $\alpha_\delta = 0,55-0,6$. Результати експериментів показують, що навіть із урахуванням виявлених особливостей конструкції даний генератор можна розглядати в якості вигідної альтернативи генераторам з магнітоелектричним збудженням.

Ключові слова: ротор, статор, обмотка, магнітна система, методика проектування.

V.D. KOSENKOV

Khmelnitsky National University

D.A. IVLEV, V.V. BULHAR, S.M. OGINSKA, T.M. MOSPAN

Odesa National Polytechnic University

THE ADJUSTMENT OF THE DC GENERATOR DESIGN TECHNIQUE WITH A WINDINGLESS ROTOR ACCORDING TO THE RESULTS OF EXPERIMENTAL STUDIES

Today, the market of the most popular wind power plants of low power 1-5 kW is divided into two unequal segments: a large segment of cheap but non-energy-efficient high-speed wind turbines, designed for a nominal wind speed of 10-12 m/s; a small segment of energy-efficient, but expensive low-speed wind turbines, designed for a nominal wind speed of 8-9 m/s. The cost of low-speed wind turbines is on average 3-4 times higher than the price of high-speed wind turbines of the same power, which is mainly due to the cost of permanent magnets. An experimental sample of a low-speed, energy-efficient DC generator with a wind-free rotor and electromagnetic excitation costs 2.2 times less than a serial analogue. The total cost of installation becomes comparable to the cost of high-speed installations. The design technique of this generator was based on a theoretical analysis of magnetic and thermal models. The results of the physical tests of the experimental sample made it possible to add several additions and refinements to its design methodology. Thermal tests have confirmed the correctness of the choice of values of electromagnetic loads. The experiment showed that this design could withstand 5-fold current overload without commutating poles and a compensation winding. The results of the research showed the features of this generator that were not taken into account in the models: double frequency of magnetization reversal in the central stator; the presence of a parasitic magnetic flux of scattering between the poles in the inner stator. The results of the experiment allowed to clarify the design methodology and to develop additional recommendations for the design of this generator: choose the number of poles, taking into account the magnitude of the frequency of magnetization reversal in the central stator; accept the value of the pole overlap equal to $\alpha\delta = 0,55-0,6$. The results of the experiments show that even taking into account the identified design features, this generator can be considered as an effective alternative to generators with magnetolectric excitation.

Keywords: rotor, stator, armature winding, magnetic system, design technique.

Постановка проблеми

Сьогодні ринок найбільш популярних вітроенергетичних установок (ВЕУ) малої потужності 1–5 кВт [1] поділяється на два нерівнозначні сегменти: великий сегмент дешевих, але енергонеефективних високооберткових ВЕУ, розрахованих на номінальну швидкість вітру 10–12 м/с; малий сегмент енергоефективних, але дорогих низькооберткових ВЕУ, розрахованих на номінальну швидкість вітру 8–9 м/с.

Слід зазначити, що поняття енергоефективності стосовно до ВЕУ має на увазі не величину ККД, а кількість енергії виробленої протягом місяця. Високообертковий синхронний генератор з магнітоелектричним збудженням, встановлюваний на всі малі ВЕУ, як правило, має ККД 91–95%, а низькообертковий 85–90%, однак низькооберткова ВЕУ протягом місяця виробить більше енергії, ніж високооберткова.

Величина виробітку електроенергії прямо залежить від швидкості вітру. В Україні тільки 5% території має середньорічну швидкість вітру 10 м/с, на всій іншій території ця цифра не перевищує 5 м/с, тому низькооберткова ВЕУ більш підходить для нашої країни.

Повсюдне поширення таких ВЕУ стримується їхньою високою ціною, що багато в чому обумовлене вартістю постійних магнітів. За оцінкою експертів [2] вартість постійних магнітів у загальній ціні

синхронного генератора з магнітоелектричним збудженням становить від 30% до 50%.

Синхронні генератори з електромагнітним збудженням постійні магніти не використовують, але мають свої недоліки, а саме наявність на роторі ковзаючого контакту для підведення напруги до обмоток збудження, високий момент інерції через масу обертових обмоток, технологічні проблеми створення багатополусної конструкції ротора з явно вираженими полюсами при малому діаметрі статора і т.і.

Використання генератора постійного струму з безобмотковим ротором (ГПСБР) і електромагнітним збудженням у складі *низькообертової* ВЕУ вирішує ці проблеми. Експериментальний зразок ГПСБР коштує в 2,2 рази дешевше серійного синхронного генератора з магнітоелектричним збудженням аналогічної потужності й швидкості обертання. Загальна вартість такої *низькообертової енергоефективної* ВЕУ стає порівнянною з вартістю *високообертових* установок.

Методика проектування даного генератора базувалася на теоретичному аналізі магнітних і теплових моделей. Результати фізичних випробувань експериментального зразка дозволили внести в його методику проектування ряд доповнень і уточнень.

Основні результати

Конструкція ГПСБР. Магнітна система генератора (рис. 1, а) не має спільного ярма і складається з ряду магнітно-незв'язаних зубців Ш-подібної форми 1, між якими укладено секції обмотки якоря 2, обмоток збудження 3, безобмоткових полюсів 4 і немагнітних дисків 5. Секції обмотки якоря укладаються із частковим зсувом на величину полюсного розподілу τ (рис. 1, б). Цим забезпечується односпрямованість результуючого магнітного потоку, що пронизує секцію й, відповідно, збереження електромагнітного моменту заданого знака.

ГПСБР належить до типу індукторних машин з двома обмотками на статорі і зубчастим магнітопроводом ротора, у яких, як відомо, магнітна індукція в робочому повітряному проміжку змінюється тільки за величиною, залишаючись незмінною у напрямку. У індукторній машині класичної конструкції величина коефіцієнта використання $K_{вик} = 0,26 \div 0,46$, тому маса активної частини й габарити індукторного генератора більші, ніж у звичайного синхронного генератора з тією ж наведеною ЕРС і потужністю. ГПСБР має $K_{вик} = 0,66$ (рис. 1 б), що дозволяє зменшити його вагу і розміри в порівнянні із класичною індукторною машиною.

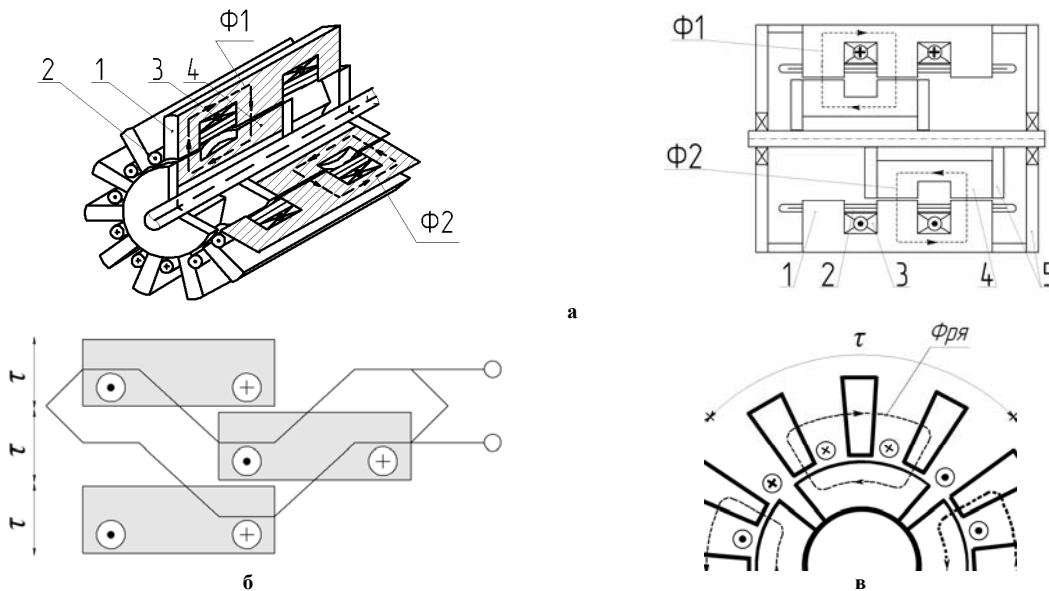


Рис. 1. ГПСБР: а – магнітна система; б – секція обмотки якоря; в – ослаблення поперечної реакції якоря

Наявність відкритих з обох сторін пазів між зубцями статора створює ряд повітряних проміжків, що призводить до зниження магнітної провідності магнітопроводу в поперечному напрямку, що, у свою чергу, приводить до послаблення поперечної реакції якоря (рис. 1 в).

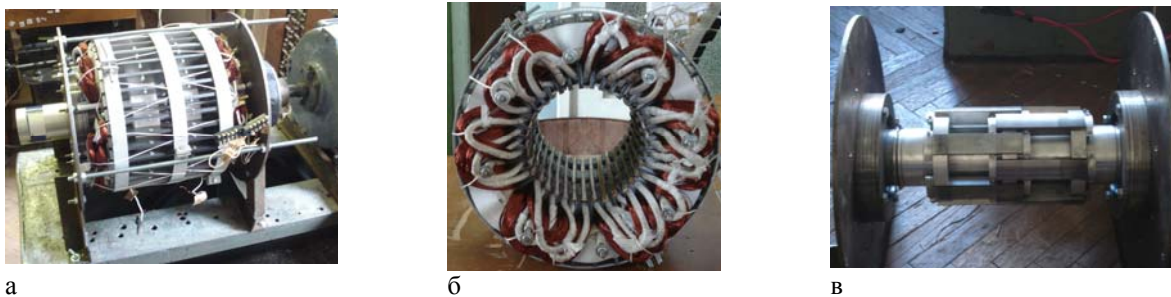


Рис. 2. ГПСБР: а – зовнішній вигляд; б – статор; в – ротор

Результати дослідження експериментального зразка ГПСБР. Для підтвердження працездатності нової конструкції та теоретичних висновків про її високу переважувальну здатність було виготовлено експериментальний зразок (рис. 2) $P_n = 0,5$ кВт; $U_n = 230$ В; $I_n = 2,2$ А; $n_n = 600$ об/хв для

роботи в складі ВЕУ. Швидкість вітру для отримання номінальної потужності 8 м/с. Випробування проводилися за стандартною методикою, прийнятою для машин постійного струму [3].

Випробування експериментально довели працездатність нової конструкції. Зовнішній вигляд характеристик повністю відповідає характеристикам класичної машини постійного струму (рис. 3).

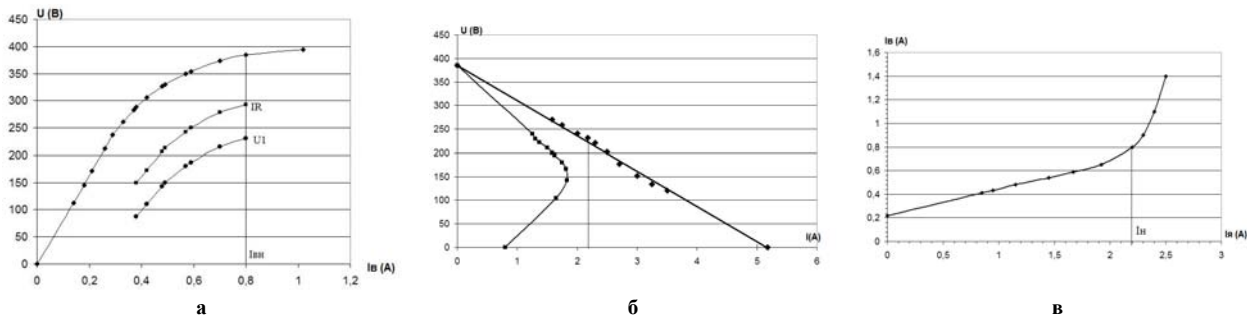


Рис. 3. ГПСБР: а – навантажувальна характеристика; б – зовнішні характеристики; в – регульовальна характеристика

Генератор має дві паралельні гілки по три укрупнені секції в кожній гілці (H1-K18) і (H1* -K18*), які через діодні мости за схемою на рис. 4 підключені до навантаження.

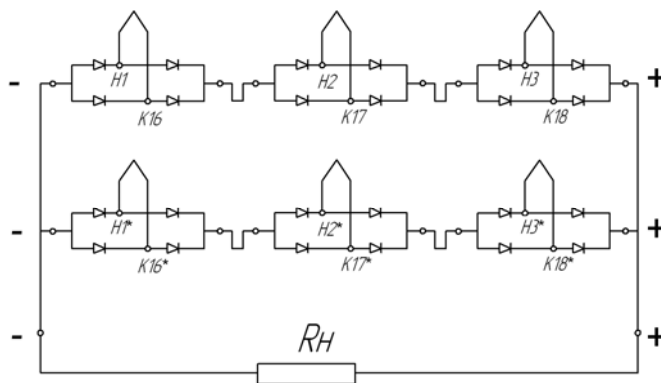


Рис. 4. Схема випрямлення

Результати випробувань показали, що в генераторі через відсутність комутатора відбувається 30% недобір потужності. Характеристика навантаження зміщена вниз на 90 В, що пов'язано не з реакцією якоря, а з недобором потужності (рис. 3, а). Даний недолік може бути усунено при підключенні секцій до напівпровідникового комутатора.

Як відомо [4], на вигляд зовнішньої характеристики (рис. 3, б) генератора впливають два фактори: поле реакції якоря і падіння напруги в ланцюзі якоря. За відсутності першого фактора дана залежність набуває лінійний вигляд і залежить тільки від струму навантаження. Те ж саме можна сказати і про вигляд регульовальної характеристики (рис. 3 в).

Теплові випробування (рис. 5) проводились при природному охолодженні, температурі навколишнього середовища 11 °С і струмі якоря $I_a = 3,3$ А, тобто $1,5 I_{ном}$. Однак генератор пропрацював в цьому режимі 100 хв (замість 1 хв за ДСТУ) і вийшов на усталені значення температури, що не перевищують 100 °С при класі ізоляції обмоток Н.

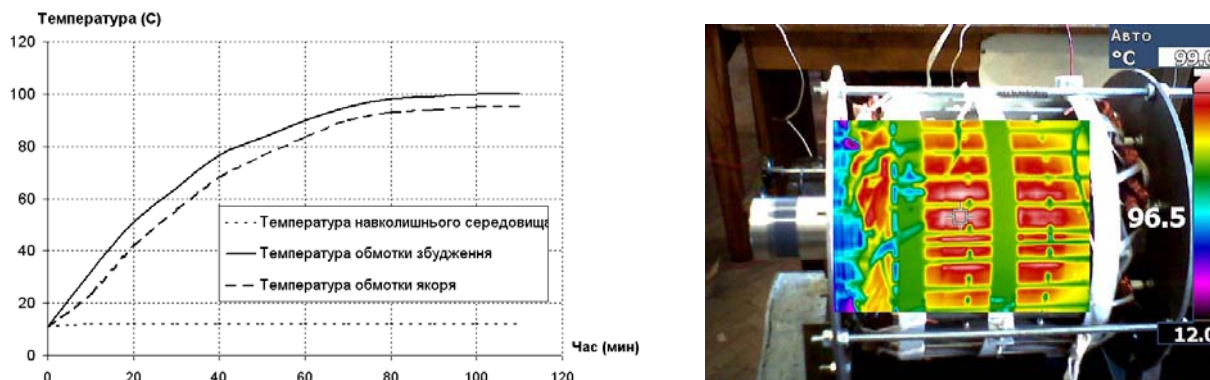


Рис. 5. Теплові випробування

Результати теплових випробувань підтвердили правильність вибору значень електромагнітних навантажень. Експериментальне підтвердження отримав теоретичний висновок про високу перевантажувальну здатність ГПСБР. Перехід до магнітної системи, що складається з ряду магнітно-

незв'язаних контурів, дозволяє істотно послабити поле поперечної реакції якоря, відмовитися від компенсаційної обмотки та обмотки додаткових полюсів і зменшити робочий повітряний проміжок до мінімально технологічно можливої величини.

На (рис. 6а) показано результуюче магнітне поле для $I_H = 2,2$ А. Як видно з рис. 6б, відмова від загального ярма дозволяє ГПСБР витримувати 5-кратне перевантаження по струму.

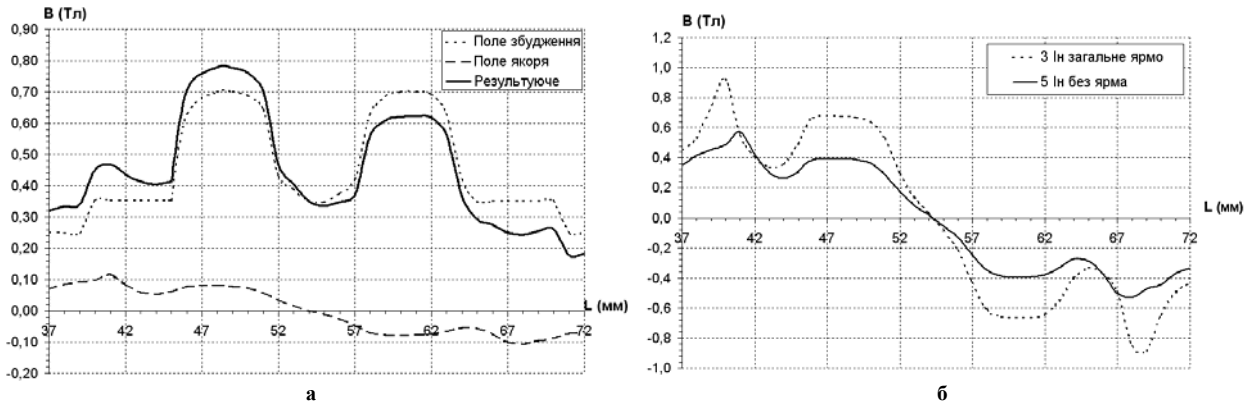


Рис. 6. Розподіл магнітної індукції в робочому повітряному проміжку ГПСБР: а – результуюче магнітне поле для $I=I_H$; б – порівняння розподілу для $5I_n$ в конструкції без загального ярма та $3I_n$ в конструкції із загальним ярмом

Виявлені недоліки. Електромеханічне перетворення енергії в ГПСБР пов'язане зі зміною взаємної індуктивності між обмоткою якоря та обмоткою збудження, яке відбувається при переміщенні полюсів ротора відносно зубців магнітопроводу статора (рис. 7) при цьому під центральним зубцем частота перемагнічування подвоюється $f = V/\tau$ (рис. 7 б) що необхідно враховувати при проектуванні ГПСБР.

Також експеримент показав наявність паразитного магнітного потоку розсіювання Φ_s між полюсами у центральному статорі (рис. 8), у результаті чого послаблюється основний магнітний потік Φ_0 .

Отримані результати дозволили виробити додаткові рекомендації із проектування даного генератора:

- вибирати число полюсів, виходячи з максимально можливої величини частоти перемагнічування в центральному статорі 50 Гц;
- прийняти величину полюсного перекриття рівної $\alpha_\delta = 0,5 \div 0,6$.

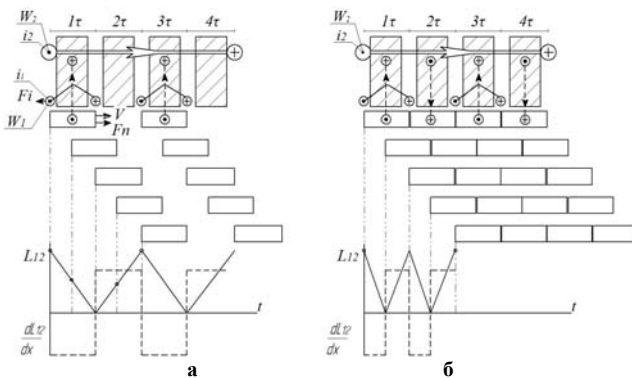


Рис. 7. Зміна потокозчеплення в часі: а – під крайніми зубцями статора; б – під центральним зубцем статора

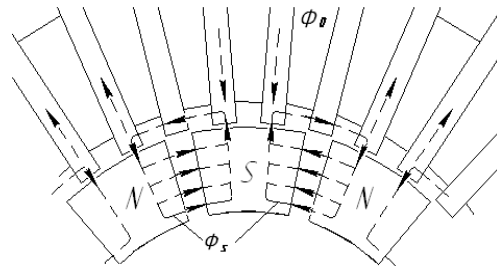


Рис. 8. Потік розсіювання між полюсами

Методика проектування. Отримані результати експериментів дозволили уточнити методику проектування ГПСБР і внести в неї ряд доповнень, що усувають виявлені недоліки. Зокрема, були заново проведені розрахунки по оптимізації ГПСБР, у які були внесені обмеження по величині частоти перемагнічування й величині полюсного перекриття.

Частина етапів розрахунків класичного генератора постійного струму може бути застосована й при розрахунках ГПСБР. Загальний порядок розрахунків *низькооберткових* 250–300 об/хв ГПСБР малої потужності 1–5 кВт представлений нижче. Початковими даними для проектування є:

- номінальна потужність генератора P_H (Вт);
- номінальна вихідна напруга U_H (В);
- номінальна швидкість обертання n_n (об/хв).

Вибір головних розмірів.

1. прийняти ККД $\eta = 70 \%$;

2. за відомою формулою $I_H = \frac{P_H}{U_H}$ визначити струм генератора [5];

3. за формулою $P_\Sigma = \frac{1+\eta}{2 \cdot \eta} \cdot P_H$ визначити електромагнітну потужність [5];

4. за співвідношенням $\frac{P_e}{n_n}$ знаходимо D_n (рис. 9)
5. прийняти значення лінійного струмового навантаження A : для природного охолодження $A=200 \div 250$ А/см; для самовентиляції $A=300 \div 400$ А/см;
6. прийняти індукцію в робочому повітряному проміжку $B_\delta = 0,8$ Тл;
7. прийняти значення індукції в зубцях $B_z = 1,5 \div 1,7$ Тл;
8. прийняти коефіцієнт полюсного перекриття $\alpha_\delta = 0,5 \div 0,6$;
9. прийняти співвідношення $\lambda = 0,5$;
10. за залежністю $2p=f(D_n)$ знаходимо $2p$ (рис. 10);
11. прийняти значення щільності струму j :
- для природного охолодження $j = 4 \div 5$ А/мм²;
- для самовентиляції $j = 5 \div 6$ А/мм².
12. робочий повітряний проміжок δ приймають мінімально технологічно можливої величини.

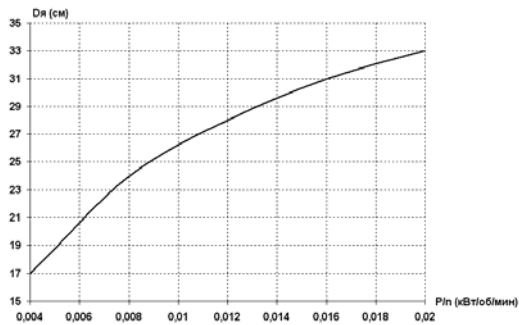


Рис. 9. Залежність $D_n = f\left(\frac{P_e}{n_n}\right)$

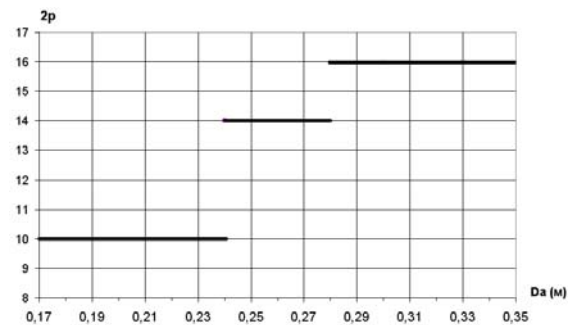


Рис. 10. Залежність $2p=f(D_n)$

Подальший електромагнітний розрахунок проводиться за традиційною методикою проектування машин постійного струму. Ряд стандартних етапів розрахунків класичної МПТ при проектуванні даної машини не потрібні. Так, у ГПСБР не потрібні розрахунки колектора, додаткових полюсів і компенсаційної обмотки, що суттєво зменшує обсяг обчислювальної роботи при виконанні електромагнітного розрахунку.

Висновки. Результати експериментів показують, що даний генератор можна розглядати в якості альтернативи генераторам ВЕУ з магнітоелектричним збудженням.

Література

1. Pitteloud J. 2017 Small Wind World Report Summary [Електронний ресурс] / J. Pitteloud, S. Gsänger // WWEA. – 2017. – Режим доступу : <https://wwindea.org/blog/2017/06/02/wwea-released-latest-global-small-wind-statistics>
2. Burress T. Non-Rare Earth Motor Development [Електронний ресурс] / Tim Burress // Oak Ridge National Laboratory. – 2015. – Режим доступу : https://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/06/f24/edt062_burress_2015_o.pdf.
3. Жерве Г. К. Промышленные испытания электрических машин / Г. К. Жерве. – Л. : Энергоатомиздат, 1984. – 408 с.
4. Вольдек А. И. Электрические машины / А. И. Вольдек. – Л. : Энергия, 1974. – 840 с.
5. Морозов А. Г. Расчет электрических машин постоянного тока / А. Г. Морозов. – М. : Высш. школа, 1972. – 227 с.

References

1. Pitteloud J. 2017 Small Wind World Report Summary / J. Pitteloud, S. Gsänger // WWEA. – 2017. URL: <https://wwindea.org/blog/2017/06/02/wwea-released-latest-global-small-wind-statistics>
2. Burress T. Non-Rare Earth Motor Development / Tim Burress // Oak Ridge National Laboratory. – 2015. URL: https://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/06/f24/edt062_burress_2015_o.pdf.
3. Zherve G. K. Promyshlennye ispytaniya elektricheskikh mashin / G. K. Zherve. – L. : Energoatomizdat, 1984. – 408 s.
4. Voldek A. I. Elektricheskie mashiny / A. I. Voldek. – L. : Energiya, 1974. – 840 s.
5. Morozov A. G. Raschet elektricheskikh mashin postoyannogo toka / A. G. Morozov. – M. : Vyssh. shkola, 1972. – 227 s.

Рецензія/Peer review : 21.5.2019 р.

Надрукована/Printed : 2.6.2019 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Горошко А.В.

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДИК ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ВИПРОБУВАНЬ ДИСКОВИХ МІКРОЗРАЗКІВ

В даній роботі проведено порівняльний аналіз ряду методик визначення характеристик міцності сталей методом продавлювання дискових мікроразків. Дослідження проводились з використанням матеріалів сталей 45, 10ГН2МФА та 15Х2НМФА. Визначено значення характеристик міцності цих матеріалів з використанням різних методик. Показано, що відхилення значень характеристик міцності даних матеріалів, які визначено методом продавлювання дискових мікроразків з використанням найбільш поширених методик, від таких, отриманих при випробуванні на розтяг, у більшості випадків перевищує 10%. Отримані результати будуть використані у подальших дослідженнях для розробки рекомендацій щодо використання проаналізованих методик.

Ключові слова: small punch test, дисковий мікроразок, характеристики механічних властивостей, границя текучості, границя міцності, сталь.

COMPARATIVE ANALYSIS OF MECHANICAL PROPERTIES DETERMINATION METHODS BY SMALL PUNCH TEST

Ensuring reliable operation of dangerous objects during or beyond the source life is a very important task in the context of the current economic situation in the Ukrainian energy sector. For this purpose, continuous full-scale monitoring of the main and additional equipment state of power plants is carried out in accordance with the normative documents. Estimation of the current state of materials is carried out according to certain parameters. One of these parameters is the value of the mechanical properties. Determining the mechanical properties of structures materials by the results of uniaxial tension tests is not always possible as it requires, in most cases, the destruction of the structure, the availability of sufficient volume of material for the production of specimen and complex and expensive testing equipment. To avoid the aforementioned limitations, new indirect methods for determining the mechanical properties are developed. Among them – the small punch test. Today, a number of different methods have been developed for determining the mechanical properties of materials based on the results of small punch test. In this paper, a comparative analysis of the most common methods for determining the strength properties of steels by small punch test. The research was carried out using materials of different strength – steel 45, 10HN2MFA and 15X2NMFA. The deviation value was determined in the strength properties determining of these materials using different methods. It has been shown that the deviation of the strength properties of these materials, which is determined by small punch test using the most common techniques, from those obtained during the tensile test, exceeds 10%. The results will be used in further studies to improve the correlation dependencies in the determination of mechanical properties by small punch test.

Keywords: small punch test, microspecimen, mechanical properties, yield strength, ultimate strength, steel.

Вступ

Забезпечення надійної експлуатації об'єктів підвищеної небезпеки в проектній та понадпроектній строк служби є дуже важливою задачею в контексті сучасної економічної ситуації в енергетичному секторі України. Для цього проводиться постійний всебічний моніторинг стану основного та допоміжного обладнання енергетичних установок, що здійснюється згідно відповідних нормативних документів. Оцінка поточного стану матеріалів конструкцій проводиться за певними параметрами. Одними з таких параметрів є значення характеристик механічних властивостей.

Визначення механічних характеристик матеріалів реальних конструкцій за результатами випробувань на одновісний розтяг не завжди можливе так як потребує в більшості випадків руйнування конструкції, наявності достатнього об'єму матеріалу для виготовлення зразків і складної та дорогавартісної випробувальної техніки. Для уникнення вищезгаданих обмежень розробляються нові непрямі методи визначення механічних характеристик. Серед них – метод продавлювання дискового мікроразка. Суть методу полягає у виготовленні мініатюрного дискового зразка товщиною t із мінівірізок досліджуваного матеріалу, який закріплюється у відповідному затискному пристрої та піддається деформуванню індентором у формі кулі радіуса r із записом діаграми процесу продавлювання. За параметрами цієї діаграми із використанням кореляційних залежностей визначаються характеристики механічних властивостей матеріалу. На сьогоднішній день розроблено цілий ряд різних способів визначення механічних властивостей матеріалів за результатами випробувань дискових мікроразків на продавлювання.

Японські вчені Мао і Такахаші [1] у 1987 р. запропонували методику визначення умовної границі текучості методом індентування дискового мікроразка для легованих сталей. Ними було отримано лінійну кореляційну залежність між значенням умовної границі текучості $\sigma_{0,2}$ при розтягу зразка та величиною навантаження F_y на дисковий мікроразок в момент переходу від пружної до пружно-пластичної деформації:

$$\sigma_{0,2} = \alpha \frac{F_y}{t^2}, \text{ МПа} \quad (1)$$

де α – коефіцієнт матеріалу, рівний для легованих сталей 0,36, t – товщина зразка.

З метою зменшення розкиду значень умовної границі текучості, оціненої за результатами продавлювання дискового мікроразка, кореляційна залежність (1) за останні роки неодноразово уточнювалася. Так, наприклад, Спаєтїг та його колеги, запропонували при визначенні умовної границі текучості реакторних сталей використовувати коефіцієнт α рівний 0,375 [2].

Лакалле та його колеги для визначення умовної границі текучості за результатами продавлювання дискових мікроразків запропонували кореляційну залежність, у якій окрім навантаження F_y і товщини зразка t фігурує коефіцієнт Пуассона μ [3]:

$$\sigma_{0,2} = 1,16(1 + \mu) \frac{F_y}{t^2}, \text{ Мпа} \quad (2)$$

Інша емпірична залежність була представлена китайськими вченими Ванг і Ші в роботі [4]. В експериментально отриманій залежності присутній новий параметр – радіус кульки індентора r :

$$\sigma_{0,2} = \frac{F_y - 94,37}{0,158 \cdot 2\pi r t}, \text{ Мпа} \quad (3)$$

Аналогічну залежність, але теоретичним шляхом, ґрунтуючись на теорії пластин та оболонки, було отримано шведськими вченими для низьколегованої сталі 1Cr-0,5Mo та аустенітної нержавіючої сталі 18Cr-9Ni [5]:

$$\sigma_{0,2} = \frac{3F_y(1 + \mu)}{2\pi t^2} \ln \frac{D}{2r'}, \text{ Мпа} \quad (4)$$

де D – діаметр отвору в нижній затискній втулці, а r' – ефективний радіус рівномірно розподіленого навантаження в центрі мікроразка:

$$r' = \sqrt{1,6r^2 + t^2} - 0,675t, \text{ мм}$$

Емпірична залежність, яка враховує коефіцієнт Пуассона μ , радіус індентора r та діаметр отвору нижньої затискної втулки D , була представлена Ассасом та авторами [6]:

$$\sigma_{0,2} = 1,5(1 + \mu) \frac{F_{\max}}{\pi t^2} \left[\ln \frac{0,5D}{0,8r} + \left(\frac{0,8r}{D} \right)^2 \right], \text{ Мпа} \quad (5)$$

Границя міцності методом продавлювання дискових мікроразків визначається кореляційною залежністю між значенням границі міцності при розтягу та параметрами діаграми деформування дискового мікроразка. Японські вчені Мао і Такахаші [1] запропонували визначати границю міцності за такою кореляційною залежністю:

$$\sigma_b = \beta_1 \frac{F_{\max}}{t^2} + \beta_2, \text{ Мпа} \quad (6)$$

де F_{\max} – максимальне навантаження на дисковий мікроразок перед руйнуванням, β_1 і β_2 – коефіцієнти, рівні відповідно 0,13 і -320 для легованих сталей.

Експериментуючи з конструкційними сталями S460N, E690, Grade A і алюмінієвим сплавом AlCuMg іспанські вчені запропонували нову кореляційну залежність для визначення границі міцності, в якій окрім максимального навантаження фігурує навантаження F_l , що відповідає моменту переходу від пружно-пластичного прогину до мембранного витягування дискового мікроразка на діаграмі деформування [3]:

$$\sigma_b = \alpha \frac{F_l}{t^2} + \beta \frac{F_{\max} - F_l}{t}, \text{ Мпа} \quad (7)$$

де α і β – коефіцієнти рівні 0,23 і 0,09 відповідно.

Китайськими вченими експериментально отримана кореляційна залежність, в якій присутній новий параметр – радіус кульки індентора r [4]:

$$\sigma_b = \frac{F_{\max} - 202,17}{0,644 \cdot 2\pi r t}, \text{ Мпа} \quad (8)$$

Вчені Норріс і Паркер [7] в запропонованій кореляційній залежності окрім радіуса кульки індентора використали геометричний параметр затискного пристрою, а саме – діаметр отвору нижньої затискної втулки D :

$$\sigma_b = \frac{F_{\max}}{t[4,64r - 0,9(D - 2(r + t)) + 0,56]}, \text{ Мпа} \quad (9)$$

Естонський вчений Клевцов [8] запропонував значення границі міцності визначати як функцію від величини максимального навантаження:

$$\sigma_b = 0,184F_{\max}, \text{ Мпа} \quad (10)$$

На відміну від інших кореляційних залежностей в формулі (10) не врахована товщина зразка, що обмежує її застосування.

Вчений Родрігез разом з колегами [9] запропонували свої значення коефіцієнтів β_1 і β_2 в рівнянні (6) 0,077 і 218 відповідно.

Метою даної роботи було проведення порівняльного аналізу ряду методик визначення характеристик механічних властивостей за результатами випробувань дискових мікрорізків та оцінка їх достовірності за результатами випробувань на одновісний розтяг.

Матеріали, зразки, обладнання та методика випробувань

Об'єктом дослідження було обрано вуглецеву сталь 45 та дві марки теплостійких сталей ферито-перлітного типу 10ГН2МФА та 15Х2НМФА, які широко використовуються для виготовлення конструкцій та відповідального обладнання АЕС.

Зразки для випробувань, методика та визначення характеристики механічних властивостей сталей за даними випробувань на одновісний розтяг із вище згаданих матеріалів здійснювались згідно [10]. Випробування на одновісний розтяг проводились на універсальній сервогідроліній машині Instron 8802 (рис. 2а). Вимірювання деформації зразків здійснювалось тензометром з базою 50 мм. Швидкість переміщення рухомого захвату складала 0,02 мм/хв.

Заготовки для мікрорізків виготовлялись із мінівирізок. Товщина заготовки складала не менше, ніж 1,5 товщини зразка. Для випробувань методом продавлювання дискового мікрорізка використовувались зразки діаметром $d = 8$ мм та товщиною $h = 0,5$ мм. Креслення зразка та схема його закріплення в затискному пристрої зображені на рис. 1. Непаралельність робочих поверхонь (поверхня контакту кульки із мікрорізком і поверхня контакту мікрорізка із нижньою втулкою затискного пристрою) не перевищувала 0,001 мм. Граничне відхилення по товщині з механічно обробленими робочими поверхнями було не більше $\pm 0,005$ мм. Випробування методом продавлювання дискового мікрорізка проводились згідно [11] на розробленій в Інституті проблем міцності імені Г. С. Писаренка НАН України установці UTM-20НТ (рис. 2б).

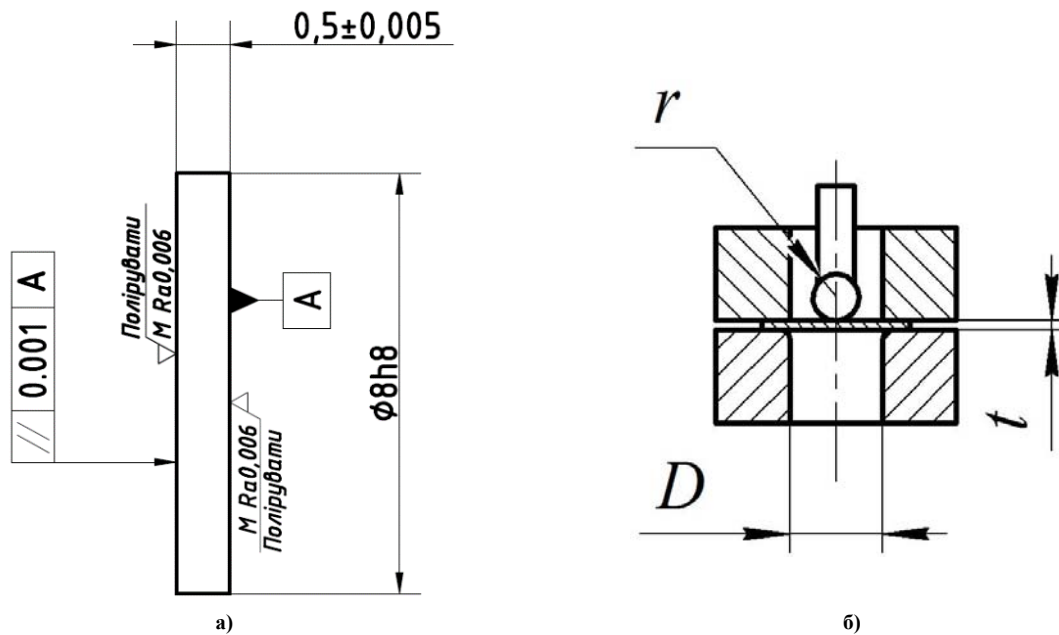


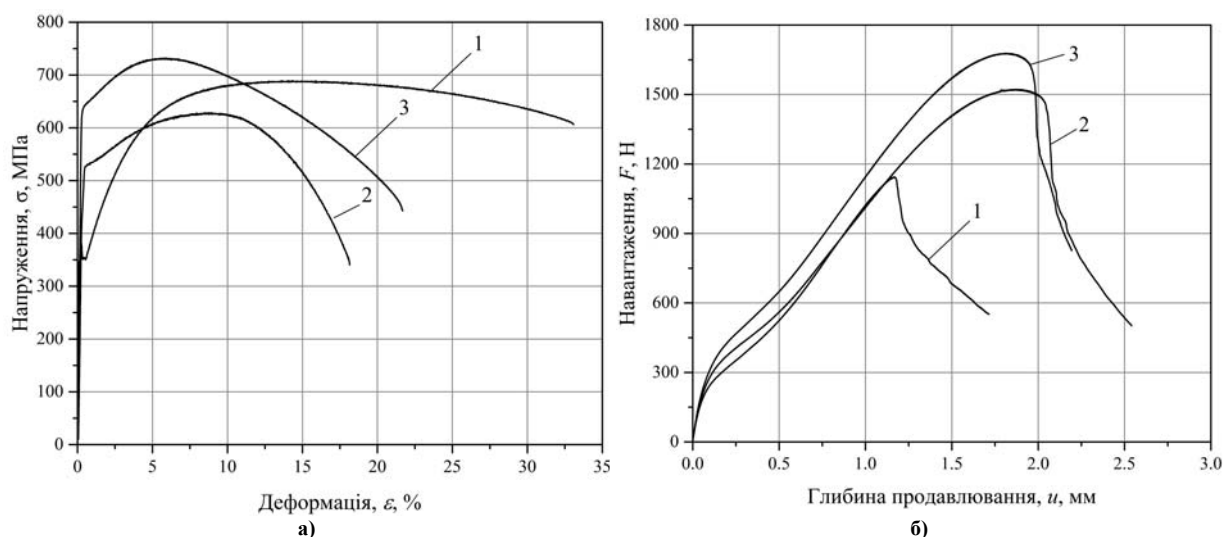
Рис. 1. Креслення дискового мікрорізка (а) та схема закріплення зразка в затискному пристрої (б): r – радіус індентора, t – товщина зразка, D – діаметр нижньої затискної втулки

Результати випробувань та їх обговорення

Порівняльний аналіз методик оцінки міцності матеріалів проводився шляхом зіставлення результатів визначення характеристик механічних властивостей конструкційних сталей за діаграмами деформування циліндричних зразків на розтяг з результатами оцінки тих же характеристик, визначених за діаграмами деформування дискових мікрорізків. Типові діаграми деформування на розтяг та продавлювання сталей 45, 10ГН2МФА та 15Х2НМФА представлено на рис. 3.



а) б)
Рис. 2. Випробувальне обладнання: а) Instron 8802, б) UTM-20HT



а) б)
Рис. 3. Типові діаграми деформування зразків із сталей 45 (1), 10ГН2МФА (2) та 15Х2НМФА (3): а) одновісний розтяг; б) продавлювання дискових мікрозразків

Значення характеристик механічних властивостей конструкційних сталей, отримані шляхом випробувань зразків на розтяг та методом продавлювання дискових мікрозразків приведено в табл. 1 і 2.

Таблиця 1

Порівняльні результати визначення границі текучості $\sigma_{0,2}$, Мпа, конструкційних сталей, визначених різними методиками

Марка сталі	Одновісний розтяг	Продавлювання дискових мікрозразків за методиками					
		[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]
45	353,9	344,8	359,2	1388,8	228,0	236,3	432,0
10ГН2МФА	528,0	425,9	443,6	1715,4	311,0	290,8	533,5
15Х2НМФА	638,1	489,0	509,4	1969,8	381,2	334,1	612,7

Порівняльні результати визначення границі міцності σ_b , Мпа, конструкційних сталей визначених різними методиками

Марка сталі	Одновісний розтяг	Продавлювання дискових мікроразривків за методиками					
		[1]	[3]	[4]	[7]	[8]	[9]
45	687,7	249,1	594,7	347,3	367,0	197,0	555,1
10ГН2МФА	626,9	507,7	728,4	534,2	528,8	280,5	708,2
15Х2НМФА	730,8	590,9	846,9	597,2	582,7	309,5	757,5

Видно, що запропоновані методики для визначення значень умовної границі текучості за діаграмою деформування дискових мікроразривків сталеву кулькою можна використовувати лише для окремих сталей. Наприклад, для сталі 45 найбільш точними виявились методики [1] та [2], відхилення результатів за якими порівняно з даними випробувань циліндричних зразків на розтяг не перевищує 2,6% та 1,5% відповідно, тоді як для сталі 10ГН2МФА – методика [4] з відхиленням 12,1%, а для сталі 15Х2НМФА – методики [4] та [5] з відхиленням 7,7% та 5,6% відповідно. Точність визначення значень границі міцності суттєво нижча. Жодна з описаних методик не має переваг порівняно з іншими. У більшості випадків відхилення між значеннями границі міцності досліджуваних сталей, визначених за результатами випробувань на розтяг і за діаграмами деформування дискових мікроразривків перевищують 10%. Виключення складає методика [9], за якою відхилення для сталі 15Х2НМФА не перевищує 3,7%.

Висновки

Таким чином, на основі виконаних експериментальних досліджень на розробленому обладнанні, проведено порівняльний аналіз найбільш поширених методик визначення характеристик механічних властивостей сталей 45, 10ГН2МФА та 15Х2НМФА за діаграмами деформування дискових мікроразривків. Визначено відхилення результатів випробувань із використанням цих методик. Показано, що відхилення значень характеристик механічних властивостей, які визначено методом продавлювання дискових мікроразривків з використанням найбільш поширених методик, від таких, отриманих при випробуванні на розтяг, в більшості випадків перевищує 10%. Отримані результати будуть використані у подальших дослідженнях для розробки рекомендацій щодо використання проаналізованих методик.

Література

1. Mao X. Development of a further-miniaturized specimen of 3mm diameter for TEM disk small punch tests / X. Mao, H. Takahashi // Journal of Nuclear Materials. – 1987. – Volume 150. – P. 42–52. – DOI: [https://doi.org/10.1016/0022-3115\(87\)90092-4](https://doi.org/10.1016/0022-3115(87)90092-4).
2. Spaetig P. Assessment of plastic flow and fracture properties with small specimen test techniques for IMIX-designed specimens / P. Spaetig, E. Campitelli, R. Bonade, N. Baluc // Nuclear Fusion. – 2005. – Volume 45. – P. 635–641. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/0029-5515/45/7/011>.
3. Lacalle R. Obtención mediante el ensayo small punch de las propiedades de tracción de materiales metálicos / R. Lacalle, J. García, J. A. Álvarez, F. Gutiérrez-Solana // XXVI Encuentro del Grupo Español de Fractura «Anales de Mecánica de la Fractura». – 2009. – Volume 2. – P. 501–506.
4. Wang Z.-X. Small punch testing for assessing the fracture properties of the reactor vessel steel with different thicknesses / Z.-X. Wang, H.-J. Shi, J. Lu, P. Shi, X.-F. Ma // Nuclear Engineering and Design. – 2008. – Volume 238. – P. 3186–3193. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2008.07.013>.
5. Eskner M. Mechanical Property Evaluation Using the Small Punch Test / M. Eskner, R. Sandström // Journal of Testing and Evaluation. – 2004. – Volume 32(4). – P. 282 – 289. – DOI: <https://doi.org/10.1520/JTE11504>.
6. Assas M. M. Identification of mechanical characteristics of materials using diminutive specimen-an empirical study / M. M. Assas, A. Husian, D. K. Sehgal // Procedia Engineering. – 2011. – Volume 10. – P. 3109–3116. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.04.515>.
7. Norris S. D. Deformation processes during disc bend loading / S. D. Norris, J. D. Parker // Materials Science and Technology. – 1996. – Volume 12(2). – P. 163–170. – DOI: <https://doi.org/10.1179/mst.1996.12.2.163>.
8. Klevtsov I. Measurement of the tensile and yield strength of boiler steels by small punch and tensile test methods / I. Klevtsov, A. Dedov, A. Molodtsov // Estonian Journal of Engineering. – 2004. – Volume 15(2). – P. 99–107. – DOI: 10.3176/eng.2009.2.03.
9. Rodríguez C. Mechanical Properties Characterization of Heat-Affected Zone Using the Small Punch Test / C. Rodríguez, J. García, E. Cabezas, F. Cárdenas, J. Belzunce, C. Betegón // Welding Journal. – 2009. – Volume 88. – P. 188–192.
10. Металеві матеріали. Випробування на розтяг. Частина 1: Метод випробування за кімнатної температури (EN 10002-1:2004, IDT) : ДСТУ EN 10002-1:2006. – [Чинний від 2008–01–07]. – Київ : Держспоживстандарт України, 2008. – 34 с. – (Національний стандарт України).
11. CWA 15627:2007 Small Punch Test Method for Metallic Materials // CEN Workshop Agreement. – 2007.

References

1. Mao X. Development of a further-miniaturized specimen of 3mm diameter for TEM disk small punch tests / X. Mao, H. Takahashi // *Journal of Nuclear Materials*. – 1987. – Volume 150. – P. 42 – 52. – DOI: [https://doi.org/10.1016/0022-3115\(87\)90092-4](https://doi.org/10.1016/0022-3115(87)90092-4).
2. Spaetig P. Assessment of plastic flow and fracture properties with small specimen test techniques for IMMIX-designed specimens / P. Spaetig, E. Campitelli, R. Bonade, N. Baluc // *Nuclear Fusion*. – 2005. – Volume 45. – P. 635 – 641. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/0029-5515/45/7/011>.
3. Lacalle R. Obtención mediante el ensayo small punch de las propiedades de tracción de materiales metálicos / R. Lacalle, J. García, J. A. Álvarez, F. Gutiérrez-Solana // *XXVI Encuentro del Grupo Español de Fractura «Anales de Mecánica de la Fractura»*. – 2009. – Volume 2. – P. 501 – 506.
4. Wang Z.-X. Small punch testing for assessing the fracture properties of the reactor vessel steel with different thicknesses / Z.-X. Wang, H.-J. Shi, J. Lu, P. Shi, X.-F. Ma // *Nuclear Engineering and Design*. – 2008. – Volume 238. – P. 3186 – 3193. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2008.07.013>.
5. Eskner M. Mechanical Property Evaluation Using the Small Punch Test / M. Eskner, R. Sandström // *Journal of Testing and Evaluation*. – 2004. – Volume 32(4). – P. 282 – 289. – DOI: <https://doi.org/10.1520/JTE11504>.
6. Assas M. M. Identification of mechanical characteristics of materials using diminutive specimen-an empirical study / M. M. Assas, A. Husian, D. K. Sehgal // *Procedia Engineering*. – 2011. – Volume 10. – P. 3109 – 3116. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.04.515>.
7. Norris S. D. Deformation processes during disc bend loading / S. D. Norris, J. D. Parker // *Materials Science and Technology*. – 1996. – Volume 12(2). – P. 163 – 170. – DOI: <https://doi.org/10.1179/mst.1996.12.2.163>.
8. Klevtsov I. Measurement of the tensile and yield strength of boiler steels by small punch and tensile test methods / I. Klevtsov, A. Dedov, A. Molodtsov // *Estonian Journal of Engineering*. – 2004. – Volume 15(2). – P. 99 – 107. – DOI: 10.3176/eng.2009.2.03.
9. Rodríguez C. Mechanical Properties Characterization of Heat-Affected Zone Using the Small Punch Test / C. Rodríguez, J. García, E. Cabezas, F. Cárdenas, J. Belzunce, C. Betegón // *Welding Journal*. – 2009. – Volume 88. – P. 188 – 192.
10. Metalevi materialy. Vyprobuvannja na rozťjagh. Chastyna 1: Metod vyprovovuvannja za kimnatnoji temperatury (EN 10002-1:2004, IDT) : DSTU EN 10002-1:2006. – [Chynnyi vid 2008–01–07]. – Kyiv : Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 2008. – 34 c. – (Natsionalnyi standart Ukrainy).
11. CWA 15627:2007 Small Punch Test Method for Metallic Materials // CEN Workshop Agreement. – 2007.

Рецензія/Peer review : 10.5.2019 р.

Надрукована/Printed : 2.6.2019 р.

Рецензент: д.т.н. Новогрудський Л.С.

РЕОЛОГІЧНІ МОДЕЛІ СЕРЕДОВИЩА З СУТТЄВИМ ВНУТРІШНІМ ТЕРТЯМ

В ході розрахунку основ фундаментів архітектурних споруд та моделювання процесу земляних робіт при їх спорудженні необхідно підібрати модель, яка б найбільш повно відображала процеси, що відбуваються в робочому середовищі, тобто в ґрунті. Авторами розглянуто існуючі моделі, що використовуються для описання деформування середовища з внутрішнім тертям. Це моделі теорії пластичності, «мікродеформування», моделі нелінійної механіки ґрунтів та моделі пластичного плинну. Деякі з цих моделей враховують нелінійність законів деформування, деякі – вплив внутрішнього тертя в граничній стадії деформування, дилатансії. Історію ж навантажень можна оцінити тільки за допомогою моделей пластичного плинну. Авторами зроблено висновок, що для описання контактної взаємодії середовища з внутрішнім тертям найраціональнішими можна вважати моделі теорії пластичності з особливими законами деформування, які встановлюватимуться експериментально.

Ключові слова: основа фундаменту; дискретне середовище; внутрішнє кулонове тертя; дилатансія.

O.A. DOROFEYEV, V.V. KOVTUN
Khmelnytskyi National University

RHEOLOGICAL MODELS OF SOILS WITH SIGNIFICANT LEVEL OF INTERNAL FRICTION

When calculating the fundamentals of the foundations of architectural structures and modeling the process of earthworks during their construction, it is necessary to select a model that would most fully reflect the processes occurring in the working environment, that is, in the soil. The contact problems of the interaction of such a medium with the elements of the structure are the most complex tasks of mechanics, since they require a coherent description of the stress-strain state of contacting objects which are considered to be the elements of structures and the environment with special laws of deformation. The authors consider existing models used to describe the deformation of the environment with internal friction. These are models of the theory of plasticity, "microdeforming", models of nonlinear soil mechanics and models of plastic flow. The effect of internal friction at all stages of deformation reflects the physical-nonlinear models of soil mechanics. They reflect two fundamental features of the deformation of materials with significant internal friction - the nonlinearity of the relations of "strain-strain" and the effect of internal coulomb friction on the laws of deformation of these materials. However, the laws of volumetric deformation do not describe the manifestation of dilatation for materials with internal friction, that is, the appearance of volumetric deformations under displacements. The most complex scientific and technical problem was the description of dilatation. To a certain extent, its manifestation in the process of material deformation can be described by means of dilatation relations of soil mechanics models of deformation type. The history of the loads can be estimated only using models of plastic flow, the history of the same loads can be estimated only with the help of models of plastic flow, the physical relations of which are formed as the relationship between the stresses and strains of deformations, and not between the stresses and achieved deformations. The authors conclude that for the description of the contact interaction of the medium with internal friction, the most rational is the model of the theory of plasticity with special laws of deformation, which will be determined experimentally.

Key words: base of foundation; discrete environment; internal coulomb friction; dilatation.

Вступ. Середовища з суттєвим внутрішнім тертям широко розповсюджені в інженерній практиці. До них відносяться природні ґрунти, гірські породи, бетони, технічна кераміка, сипкі, зернисті, гранульовані та інші фізично дискретні матеріали.

Важливою задачею інженерної механіки є описання контактної взаємодії такого середовища з елементами конструкцій.

Такі задачі доводиться розв'язувати, наприклад, під час проектування фундаментів, підпірних стін, причальних споруд морських і річкових портів, обладнання для транспортування й зберігання гранульованих матеріалів, зерна та інших матеріалів сільськогосподарського виробництва.

Ці контактні задачі є найбільш складними задачами механіки, оскільки вони вимагають сумісного описання напружено-деформованого стану контактуючих об'єктів – елементів конструкцій і середовища з особливими законами деформування.

Для описання напружено-деформованого стану елементів конструкцій використовують добре апробований апарат теорії пружності, основою якого є найпростіша реологічна модель Гука. Подібної ж

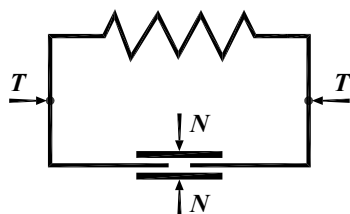


Рис. 1. Реологічна модель середовища з внутрішнім тертям

реологічної моделі для описання напружено-деформованого стану середовища з суттєвим внутрішнім тертям поки не створено, хоча запропоновано багато моделей, які в тій чи іншій мірі можуть відобразити характерні особливості деформування матеріалів з суттєвим внутрішнім тертям.

Запропоновані моделі потребують фундаментальних досліджень для встановлення достовірності описання напружено-деформованого стану середовища з внутрішнім тертям на усіх етапах його деформування.

Експериментальними дослідженнями встановлено, що реологічна модель середовища з суттєвим внутрішнім тертям повинна відображати як відомі закономірності деформування твердих тіл, так і

особливості деформування середовища, що спричинені впливом внутрішнього тертя. Таку модель умовно можна представити як поєднання моделі нелінійної теорії пружності та моделі Кулона, що враховує вплив внутрішнього тертя (рис. 1).

Дослідження, що проводились переважно на зразках природних ґрунтів, дозволяють сформувати такі особливості деформування матеріалу, які повинні бути враховані при виборі визначальних співвідношень моделі середовища з суттєвим внутрішнім тертям:

1) нелінійність законів деформування;

2) вплив внутрішнього тертя не тільки на граничній стадії деформування, але й у дограничній, тобто залежність опору зсувам τ від нормальних стискуючих напружень σ на усіх етапах деформування;

3) прояв дилатансії – виникнення об'ємних деформацій при зсувах.

Крім того, модель повинна враховувати вид напруженого стану, в якому працює середовище: загальний (тривимірний); плоско-деформаційний; осесиметричний та ін.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. На цей час не запропоновано модель, яка враховувала б усі ці вимоги. Нелінійність законів деформування беруть до уваги сучасні моделі теорії пластичності, вплив внутрішнього тертя – моделі «мікродеформування» і моделі нелінійної механіки ґрунтів. Залежність закономірностей деформування від виду напруженого стану можна не враховувати, якщо лабораторні дослідження проводити у тих самих умовах, в яких працює середовище.

Постановка завдання. Для обґрунтування найбільш раціонального напрямку досліджень цієї проблеми необхідно провести аналіз відомих реологічних моделей щодо їхньої відповідності сформульованим вимогам. **Метою** цієї статті є обґрунтування вибору найбільш раціонального класу реологічних моделей для описання напружено-деформованого стану середовища з суттєвим внутрішнім тертям.

Основний матеріал і результати. Моделі «мікродеформування»

Моделі «мікродеформування» розглядають середовище як набір макрочастинок, з'єднаних між собою особливими односторонніми контактами, що не сприймають дію розтягуючих зусиль і чинять опір зовнішньому навантаженню тільки за рахунок сил тертя, які виникають за наявності нормальних стискуючих зусиль в зоні контакту.

Залежність між силами опору T контакту і нормальним зусиллям N відповідає умові Амонта-Кулона $T = N \cdot f$, яка описує закон сухого кулонового тертя у контактах частинок.

Для переходу від одиничних мікроконтактів до середовища з безліччю контактів необхідно задатись структурою укладки однорідних чи різнорідних частинок, статистичним розподілом одиничних контактів, іноді ймовірнісними законами розподілу контактних зусиль в масиві матеріалу. Перехід від зусиль і взаємних зсувів в хаотично орієнтованих мікроконтактах до напружень та деформацій в точці середовища фактично означає заміну початково дискретної моделі «мікродеформування» на континуальну.

Детальний опис моделей, що ґрунтуються на «мікропідході», наведений у монографії І. І. Кандаурова [1].

Ідеї «мікродеформування» використовувались при розв'язанні інженерних задач. Наприклад, Г. І. Покровський запропонував використовувати модель зернистих середовищ для розрахунків дорожнього полотна. Р. А. Мюлер [2] використав дискретну модель у розрахунках підірних стін та фундаментів, І. І. Кандауров [1] розробив балочну дискретну модель тріщинуватих гірських масивів. Особливості кінематики частинок сипкого середовища за підірною стінкою при її великих зміщеннях розглянуті в роботі В. Т. Бугаєва та В. В. Ковтуна [3].

Слід відмітити, що моделі мікродеформування в більшості випадків є бездеформаційними, і, в кращому разі, можуть відобразити тільки вплив внутрішнього тертя у граничній стадії деформування, але не дозволяють описати особливості деформування матеріалів з суттєвим внутрішнім тертям в дограничній стадії.

Описання деформованого стану середовища з позицій «мікропідходу» пов'язано, як вже відмічалось, з переходом від розгляду переміщень у контактах частинок до переміщень і деформацій в кожній точці середовища з безліччю хаотично орієнтованих контактів. Це вимагає статистичного узагальнення результатів величезного об'єму експериментальних даних щодо форми, розмірів, структури укладки частинок, характеру контактів і їх ймовірнісного розподілу по розрахунковій області. Тому такий підхід не вдається реалізувати в конкретних інженерних розрахунках. Однак, теоретичні та експериментальні дослідження щодо можливості використання «мікропідходу» для описання напружено-деформованого стану середовища продовжуються. В роботах К. L. Lee, R. W. Rowe, M. Oda, H. Matsuoka, Г. Андреасяна та ін. розглядалися моделі середовища, що заповнено набором куль, циліндрів чи тілами іншої форми з регулярною чи ймовірнісною укладкою, з різними ступенями вільності переміщень і т. ін. Теоретичні співвідношення моделей порівнювались з результатами спеціальних експериментів. Найбільш відомими є експериментальні дослідження, що проведені науковцями Міннесотського, Іллінойського та Кембриджського університетів, а також дослідження на дискретних моделях Г. Дересевича, Тейлора – Шнеебелі, М. Ода та ін. В цих дослідженнях використовувалась найсучасніша на свій час експериментальна база та потужні комп'ютерні програми для ймовірнісного описання вихідних даних і операцій з ними.

Аналіз запропонованих за результатами цих досліджень моделей дозволяє зробити висновок, що в жодному випадку при формуванні визначальних співвідношень не було фундаментально обґрунтовано

перехід від дискретних характеристик (зусиль та переміщень у контактах частинок) до тензорних характеристик суцільного середовища – напружень та деформацій в точці. По суті, автори моделей з самого початку використовували для формулювання визначальних співвідношень атрибути механіки твердого деформівного тіла: напруження, деформації з деякими додатковими характеристиками мікроконтактів.

Враховуючи сказане, можна зробити висновок, що моделі «мікродеформування» здатні описати вплив внутрішнього тертя в граничному стані середовища, але не враховують інших особливостей його деформування.

Для врахування нелінійності законів деформування («фізичної нелінійності») запропоновано багато моделей теорії пластичності.

Моделі теорії пластичності деформаційного типу

Моделі цього класу, як і інші моделі механіки твердого деформівного тіла, під час формулювання крайової задачі використовують три групи рівнянь: рівняння рівноваги; геометричні рівняння нерозривності деформацій і фізичні рівняння, які пов'язують напруження, що виникають у розрахунковій області, з досягнутими (кінцевими) деформаціями матеріалу.

Рівняння рівноваги і геометричні рівняння не залежать від виду матеріалу й справедливі за умови малості деформацій.

Фізичні ж рівняння відображають особливості деформування матеріалу. Їх характер встановлюється за результатами спеціальних лабораторних випробувань макрозразків матеріалу.

В класичній теорії пластичності розглядають активний (монотонне зростання навантаження) та пасивний (розвантаження і наступне навантаження) процеси деформування. Для описання активного процесу деформування використовують апарат нелінійної теорії пружності. Пасивне ж деформування описується лінійною залежністю між напруженнями та деформаціями.

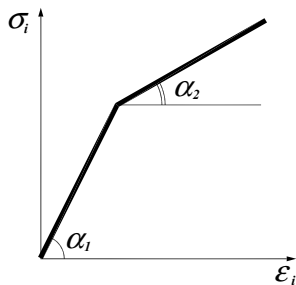


Рис. 2. Білінійна діаграма

Експериментальні дослідження закономірностей деформування матеріалів з суттєвим внутрішнім тертям показали, що в них з самого початку навантаження виникають як пружні, так і залишкові деформації, а залежність «напруження – деформації» є суцільно нелінійною і набагато складнішою ніж залежності, що характерні для твердих матеріалів.

Деформаційні моделі теорії пластичності, розроблені для твердих матеріалів, використовувались для оцінки напружено-деформівного стану ґрунтового середовища. Найчастіше розглядалися різні модифікації моделей малих пружно-пластичних деформацій.

В. В. Гапонов [4] розглянув задачу щодо оцінки напружено-деформованого стану плоскої області, заповненої сипким матеріалом з білінійною діаграмою деформування (рис. 2). Результати розв'язків на основі цієї моделі експериментально не перевірялись.

О. К. Фрьоліх [5] запропонував нелінійну модель ґрунтового середовища як набір лінійних моделей шляхом введення умовних коефіцієнтів концентрації.

Проведений М. В. Малишевим аналіз показав, що модель Фрьоліха еквівалентна моделі теорії пружності зі степеневим законом формозміни, в якому показник степені залежить від коефіцієнта Пуассона.

Модель О. К. Фрьоліха використовувалась для моделювання взаємодії елементів конструкцій з ґрунтовим середовищем. Однак необхідність призначення коефіцієнтів концентрації у кожному конкретному випадку, а також не використання фізичних залежностей «напруження – деформації» в явній формі, не дозволяють рекомендувати цю модель для описання деформацій середовища з внутрішнім тертям.

Багато науковців для досліджень напружено-деформованого стану ґрунтового середовища використовували моделі пластичного деформування зі степеневим законом формозміни.

М. В. Малишев [6] одержав розв'язок задачі про дію зосередженої сили на нелінійно деформівну півплощину. Автором прийняті такі закони деформування:

$$\epsilon_0 = \left(\frac{\sigma_0}{D} \right)^{1/\alpha} ; \quad \gamma_0 = \left(\frac{\tau_0}{A} \right)^{1/\alpha} , \tag{1}$$

де α, A, D – параметри апроксимації експериментальних кривих; $\sigma_0, \tau_0, \epsilon_0, \gamma_0$ – октаедричні напруження і деформації.

Ю. К. Зарецький [7] розглянув плоску контактну задачу для площини, що деформується за законом

$$\gamma_0 = \left(\frac{\tau_0}{A} \right)^\alpha , \quad \epsilon_0 = 0 . \tag{2}$$

Задачу про дію зосередженої сили на півплощину, що заповнена матеріалом зі степеневим зміцненням, розв'язав В. В. Соколовський [8]. Розв'язок проводився методом напружень. Виразів для переміщень не одержано.

Загальний розв'язок задачі для плоскої області, яка деформується згідно степеневому закону, отримав Н. Х. Арутюнян [9]. Задача розв'язувалась методом переміщень. Вирази для напружень та переміщень одержано в замкненій формі. На основі загального розв'язку Н. Х. Арутюнян розглянув ряд

важливих задач інженерної механіки: вдавлювання жорсткого штампа зосередженою силою чи моментом; вдавлювання жорсткого клину та ін.

Обґрунтування можливості використання степеневих моделей В. В. Соколовського, Ю. К. Зарецького, М. В. Малишева, Н. Х. Арутюняна та ін. для описання напружено-деформованого стану середовища з суттєвим внутрішнім тертям вимагає порівняння результатів теоретичного розв'язання конкретних задач з результатами їх експериментального моделювання, що само по собі є технічно складною задачею.

Аналіз відомих даних показує, що розбіжності між теоретичними і експериментальними результатами в першу чергу викликані тим, що прийнятий у розрахунках степеневий закон деформування не враховує інших особливостей деформування середовища з суттєвим внутрішнім тертям – впливу внутрішнього кулонового тертя та ефекту дилатансії.

Вплив внутрішнього тертя на усіх етапах деформування відображають відомі фізично-нелінійні моделі механіки ґрунтів.

Моделі нелінійної механіки ґрунтів, що враховують вплив внутрішнього тертя

Лабораторні дослідження процесу деформування матеріалів показали, що внутрішнє тертя впливає на особливості їх деформування не тільки у граничній, але і в дограничній стадії. Вплив внутрішнього тертя на деформування матеріалів у дограничній стадії достатньо повно відображають моделі нелінійної механіки ґрунтів деформаційного типу [10], [11].

Першою моделлю цього класу, ймовірно, була модель А. І. Боткіна [12]. Закон зміни об'єму приймався автором у вигляді лінійної залежності між першим інваріантом тензора напружень σ_0 і першим інваріантом тензора деформацій ϵ_0 .

Закон формозміни, на відміну від теорії пластичності твердих матеріалів, враховує вплив середнього стискуючого напруження σ_0 на опір зсуву τ_0 і записується у вигляді дробово-лінійної функції

$$\frac{\tau_0}{\sigma_0} = \frac{A\gamma_0}{B + \gamma_0}, \quad (3)$$

де σ_0 , τ_0 , γ_0 – напруження і деформації по октаедричній площині; A , B – експериментальні параметри.

Графіки нелінійних фізичних залежностей А. І. Боткіна показані на рис. 3, а у безрозмірних координатах і у вигляді зрізів інваріантної поверхні «напруження – деформації» – на рис. 3, б.

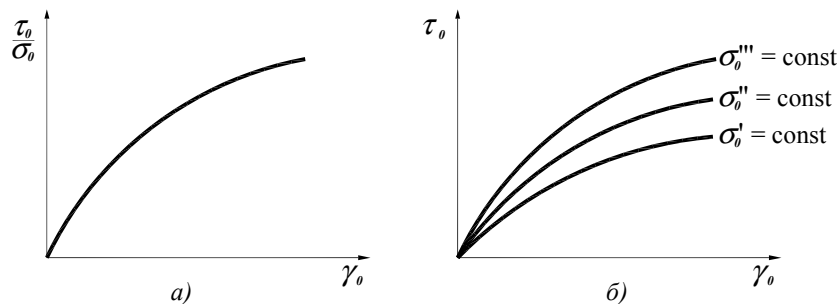


Рис. 3. Залежності «напруження – деформації» моделі А.І. Боткіна

Фізичні залежності А. І. Боткіна (3) враховують дві принципові особливості деформування матеріалів – суттєву нелінійність законів формозміни і вплив внутрішнього кулонового тертя. Тому вони привернули увагу багатьох науковців в області інженерної механіки.

Складні нелінійні залежності А. І. Боткіна не дозволяють отримати аналітичний розв'язок крайових задач інженерної механіки. Але поява потужної комп'ютерної техніки відкрила можливість розв'язання цих задач чисельними методами.

Чисельні розв'язки задач інженерної механіки з використанням залежностей А. І. Боткіна отримали Є. Ф. Винокуров [13], Ю. К. Зарецький [14], М. В. Малишев [15], В. Н. Широков, В. І. Соломін [16] та ін.

О. А. Дорофєєв [17] розглянув задачу взаємодії елементів машин з дискретним середовищем, використавши замість залежностей А. І. Боткіна запропоновану В. В. Ковтуном [18] степеневу залежність

$$\tau_0 = A\sigma_0\gamma_0^\alpha. \quad (4)$$

Дробово-лінійна (3) і степенева (4) функції добре описують вплив на деформування матеріалів внутрішнього кулонового тертя, але не відображають інші принципові особливості їх деформування – прояв дилатансії та залежність законів деформування від виду напружено-деформованого стану. Ці функції сформульовані у вигляді співвідношень між напруженнями τ_0 , σ_0 і деформаціями γ_0 , що виникають по октаедричним, рівнонахиленим до головних осей площинам. В інженерній практиці найбільший інтерес викликають «плоскі задачі», наприклад, задачі оцінки контактної взаємодії протяжних споруд з

середовищем, коли в ньому виникає плоско-деформований напружений стан. В умовах «плоскої деформації» переміщення частинок середовища можуть відбуватись тільки в площині, що перпендикулярна одній з головних осей, і ні в якому разі не в октаедричній площині.

Тому фізичні рівняння (3), (4) не мають чіткого фізичного змісту для плоскої задачі і можуть розглядатись тільки як формальні співвідношення. У зв'язку з цим з'явилися моделі, орієнтовані на конкретний вид напружено-деформованого стану: вісесиметричного, плоско-деформованого і т.п.

Ф. М. Шихієв [19] запропонував «кінематичну» модель ґрунтового середовища, орієнтовану на розв'язок плоскої задачі. Модель ґрунтується на двох визначаючих залежностях.

Закон об'ємного деформування прийнятий автором згідно принципу «еквівалентних» моделей.

Закон формозміни формулюється як співвідношення між напруженнями τ_α , σ_α і деформаціями γ_α за потенціальними площинками ковзання (рис. 4) –

$$\operatorname{tg} \rho = \frac{\tau_\alpha}{\sigma_\alpha} = \operatorname{tg} \varphi \frac{\gamma_\alpha}{\gamma_{кр}}, \quad (5)$$

де ρ – максимальний кут відхилення повного напруження від нормалі; φ – кут внутрішнього тертя (граничне значення кута ρ); γ_α , $\gamma_{кр}$ – деформації по площинкам зсуву в дограничному та граничному станах.

Отже, закон формозміни (5) сформульовано не як залежність між інваріантами тензорів напружень і деформацій, а як залежність між відношенням напружень та відношенням деформацій по умовних площинках.

Повна система статичних, геометричних і фізичних рівнянь зведена автором до нелінійного диференціального рівняння четвертого порядку, ефективного розв'язання якого не знайдено.

Г. А. Генієв [20] запропонував аналогічну модель жорстко-пружно-пластичного середовища, закон формозміни якого описується тензорним співвідношенням

$$\tau_{ij} = G_{зм} \gamma_{ij}, \quad (6)$$

де τ_{ij} – дотичні напруження; γ_{ij} – деформації зсуву; $G_{зм}$ – змінний модуль зсуву, величина якого залежить від напруженого стану в кожній точці середовища, від умовного коефіцієнта внутрішнього тертя λ , який, очевидно, пов'язаний з нормальними стискуючими напруженнями.

Фізичні рівняння моделі Г. А. Генієв записує у формі рівнянь Генкі, у які вводить змінний модуль зсуву $G_{зм}$. Залежність $G_{зм} = f(\lambda)$ показана на рис. 5. Умова $\lambda = 1$ визначає у просторі напружень

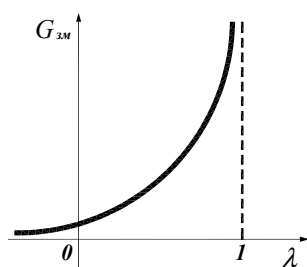


Рис. 5. Графік залежності моделі Г.А. Генієва

«жорстку» недеформівну область. Деформації матеріалу виникають тільки в точках, що лежать зовні цієї поверхні.

Ця особливість унеможливує використання моделі для оцінки напружено-деформованого стану дискретного середовища в дограничній області.

За результатами аналізу описаних моделей механіки ґрунтів деформаційного типу можна зробити висновки, що вони відображають дві принципові особливості деформування матеріалів з суттєвим внутрішнім тертям – нелінійність співвідношень «напруження-деформації» і вплив внутрішнього кулонового тертя на закони деформування цих матеріалів. Але прийняті авторами закони об'ємного деформування не

описують характерний для матеріалів з внутрішнім тертям прояв дилатансії – виникнення об'ємних деформацій при зсувах.

Описання дилатансії виявилось складною науково-технічною проблемою, яка не має вирішення вже понад півтора сторіччя.

Дилатансійні моделі деформаційного типу

Прояв дилатансії на процес деформування матеріалів в деякій мірі може бути описаний за допомогою дилатансійних співвідношень моделей механіки ґрунтів деформаційного типу.

Мабуть першим, хто запропонував такі співвідношення, був професор Г. М. Ломідзе зі своїми учнями.

Автори [21] запропонували закон зміни об'ємних деформацій ϵ_0 ґрунтів шукати у вигляді

експериментальної функції середнього нормального напруження σ_0 , інтенсивності напружень σ_i і параметра Лоде μ_σ , який визначає вид напружено-деформованого стану

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_0(\sigma_0, \sigma_i, \mu_\sigma). \quad (7)$$

Задача експериментального встановлення виду цієї функції, враховуючи її складність, є практично нездійсненною.

Проте, запропонований Г. М. Ломідзе підхід намагались реалізувати багато дослідників.

Послідовниками Г. М. Ломідзе запропоновано представляти об'ємну деформацію ε_0 в умовах плоскої деформації як суму об'ємної деформації ε_0^r від дії середнього стискуючого напруження σ_0 і дилатансійної складової ε_0^d , залежної від зсувів –

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_0^r + \varepsilon_0^d. \quad (8)$$

Запропоновано такий характер функцій

$$\varepsilon_0^r = \frac{\sigma_0}{\sigma_0 a + b}, \quad \varepsilon_0^d = \left(\alpha \varepsilon_i^\beta - \lambda \varepsilon_i \right) \left[1 + \frac{\sigma_0}{P_a} \operatorname{tg} \rho (1 + \mu_\sigma) \right], \quad P_a = 10 \text{ КПа},$$

в яких ε_i – інтенсивність деформацій; $\operatorname{tg} \rho$ – параметр міцності по Боткіну; a , b , α , β – експериментальні параметри; λ – коефіцієнт дилатансії; P_a – умовно введений коефіцієнт для збереження розмірностей у формулі.

Подібні співвідношення приймалися у розрахунках іншими науковцями.

В. Г. Столяров [22] запропонував дві фізичні залежності, що описують закономірності формозміни і об'ємного деформування, замінити однією у вигляді функції відносних узагальнених характеристик напруженого і деформованого станів, відповідно – $D_\sigma = \frac{\sigma_i}{3\sigma_0}$, $D_\varepsilon = \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_0}$. Залежність «напруження – деформації» приймається у вигляді дробово-лінійної функції

$$D_\varepsilon = \frac{B D_\sigma}{A - D_\sigma}, \quad (9)$$

де A і B – експериментальні параметри.

Дилатансійні співвідношення моделей деформаційного типу пропонували В. Ladanyi, Г. А. Генієв, Ю. К. Зарецький, Р. А. Vermeer та інші.

Слід звернути увагу на те, що в розглянутих моделях механіки ґрунтів деформацію середовища у фізичних співвідношеннях пов'язують не з інтенсивністю напружень σ_i , як у класичній теорії пластичності, а з відношенням дотичних і нормальних напружень. Ця особливість відображає вплив внутрішнього кулонового тертя і прояв дилатансії при деформуванні матеріалу не тільки в граничній, але й у дограничній стадії.

Загальним недоліком моделей деформаційного типу є те, що їхні фізичні співвідношення формулюються як залежності між напруженнями і досягнутими деформаціями. Це не дозволяє описати вплив на процес деформування послідовності (історії) навантажень, оскільки закони деформування дискретних матеріалів при активному і пасивному процесі навантаження є різними, і одним і тим напруженням можуть відповідати різні деформації.

Вплив «історії» навантаження можна описати за допомогою моделей пластичного плинину.

Дилатансійні моделі пластичного плинину

В теорії пластичності твердого тіла крім моделей деформаційного типу використовується клас моделей пластичного плинину, фізичні співвідношення яких формуються як залежності між напруженнями $\{\sigma\}$ і швидкостями деформацій $\{d\varepsilon\}$, а не між напруженнями $\{\sigma\}$ і досягнутими деформаціями $\{\varepsilon\}$.

Для визначення компонентів швидкостей деформації вводиться [23] потенціальна функція $\Phi(\{\sigma\})$

$$\{d\varepsilon\} = d\lambda \frac{\partial \Phi(\{\sigma\})}{\partial \{\sigma\}}, \quad (10)$$

де $d\lambda$ – множник Лагранжа.

Якщо за потенціальну функцію приймається умова переходу в пластичний стан, співвідношення (10) будуть відповідати асоційованому закону пластичного плинину, усі інші – неасоційованим законам.

За аналогією з теорією пластичності твердого тіла моделі пластичного плинину пропонувались для

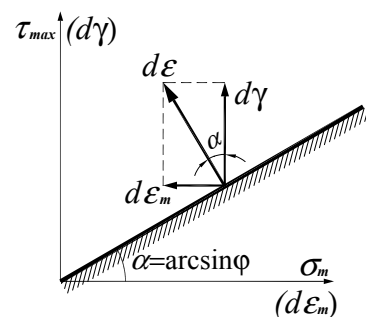


Рис. 6. Швидкості деформацій у моделі Друкера – Прагера

описання поведінки ґрунтів. В цих модифікованих моделях замість умов пластичності Сен-Венана чи Мізеса використовувались характерні для матеріалів з внутрішнім тертям умови переходу у граничний стан – умови Мора – Кулона або Боткіна.

Можливість використання умови Мора – Кулона як потенціальної функції для плоскої деформації середовища вперше продемонстровано у роботі Д. Друкера і У. Прагера [24].

За потенціальну функцію $\Phi(\{\sigma\})$ в моделі прийнята умова Мора – Кулона, яка записана в інваріантній формі як відношення максимального дотичного напруження τ_{\max} до середнього нормального напруження σ_m

$$\frac{\tau_{\max}}{\sigma_m} = \sin \varphi. \quad (11)$$

Ця залежність у площині інваріантів $\tau_{\max} - \sigma_m$ зображується прямою (рис. 6). На рисунку вісі напружень σ_m, τ_{\max} суміщені з осями швидкостей деформацій $d\varepsilon_m, d\gamma$.

Визначальне співвідношення моделі має вигляд

$$\Delta = \frac{d\varepsilon_m}{d\gamma} = \frac{\tau_{\max}}{\sigma_m} = \sin \varphi. \quad (12)$$

Безрозмірна величина Δ отримала назву коефіцієнта дилатансії. Співвідношення (12) відображає дві органічно пов'язані між собою принципові особливості деформування матеріалів – вплив внутрішнього кулонового тертя і прояв дилатансії.

Лабораторна перевірка співвідношення виявила, що теоретична величина Δ значно перевищує визначену експериментально. Наприклад, кут внутрішнього тертя φ сухого піску становить близько 30° ($\Delta = \sin 30^\circ = 0,5$). В досліджах же А. С. Строганова швидкість дилатансії щільного піску була $\Delta = 0,239$ ($\sin 14^\circ$), в досліджах Р. Roscoe і С. Фрідмана величина Δ змінювалась від $\Delta = 0,1$ до $\Delta = 0,35$. Відмічалось також не тільки розпушення, але й ущільнення пухких пісків.

Вказані розбіжності намагались ліквідувати шляхом розробки дилатансійних моделей пластичного плинину, співвідношення яких задаються довільно і не асоціюються з умовою граничного стану. Такі моделі пропонували Ю. М. Работнов, В. М. Ніколаєвський, А. С. Строганов, М. В. Малишев, Ю. К. Зарецький, А. Sowczuk, P. Stytz та інші. В більшості випадків запропоновані авторами теоретичні співвідношення не підтверджені експериментально щодо можливості їх використання для матеріалів з внутрішнім тертям.

Вибір потенціальної функції $\Phi(\{\sigma\})$, яка не асоціюється з умовою граничного стану, вимагає всебічного попереднього обґрунтування. Довільне призначення функції може призвести до суттєвих розбіжностей теоретичних і експериментальних даних у зв'язку з можливим порушенням принципу збереження енергії.

В інженерній механіці широко відомі моделі критичного стану (МКС), запропоновані групою науковців Кембриджського університету під керівництвом К. Roscoe [25] (моделі «Cam-Clay» і «Granta-gravel»).

Згідно з припущенням авторів середовище деформується тільки після досягнення граничного стану. Моделі критичного стану не описують дограничне деформування, тому безпосередньо не можуть бути використаними для оцінки напружено-деформованого середовища з суттєвим внутрішнім тертям.

Характерною особливістю розглянутих дилатансійних моделей пластичного плинину є те, що їх потенціальні функції пов'язують відношення дотичних τ і нормальних σ напружень з відношенням швидкостей об'ємних та зсувних деформацій. Це дозволяє відобразити найважливіші особливості граничного деформування дискретних матеріалів – вплив внутрішнього тертя та дилатансію, а також врахувати «історію» навантаження. Не вирішеними залишаються питання описання напружено-деформованого стану середовища на дограничній стадії, а також суттєва залежність визначальних співвідношень моделей від виду напруженого стану і відсутність експериментальних методик встановлення характеру цих співвідношень.

Висновки. Аналіз описаних реологічних моделей дозволяє зробити висновок, що для описання контактної взаємодії середовища з внутрішнім тертям і інженерних конструкцій найбільш раціональними можна вважати моделі теорії пластичності, але з особливими, характерними для цих матеріалів, законами деформування, які відображають вплив внутрішнього тертя і прояв дилатансії. Ці закони встановлюються експериментально.

Для розробки таких моделей і впровадження їх в інженерну практику необхідно розробити спеціальні методики лабораторних випробувань макрозразків матеріалу при різних схемах навантаження, в першу чергу, в умовах плоскої деформації і створити лабораторне обладнання для їх реалізації.

Література

1. Кандауров И. И. Механика зернистых сред и её применение в строительстве / И. И. Кандауров. – Л., М.: Стройиздат, 1966. – 318 с.
2. Мюлер Р. А. К статической теории распределения напряжений в зернистом грунтовом основании / Р. А. Мюлер // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1962. – № 4. – С. 10–12.
3. Бугаев В. Т. Кинематика частичек сыпучей среды при смещении ограждения / В. Т. Бугаев, В. В. Ковтун // Инженерные сооружения и оборудование морских портов : сб. науч. тр. – М.: Мортехинформреклама, 1985. – С. 11–15.
4. Гапонов В. В. Про переміщення в сипких грунтах, які перебувають у граничній рівновазі / В. В. Гапонов // Прикладна механіка. – 1959. – Т. 2. Вип. 1. – С. 52–61.
5. Фрелих О. К. Распределение давления в грунте / О. К. Фрелих. – М.: Издательство наркомхоза РСФСР, 1938. – 188 с.
6. Малышев В. М. Распределение напряжений и деформаций в нелинейно деформируемом основании, нагруженном сосредоточенной силой / В. М. Малышев // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1963. – № 3. – С. 7–11.
7. Зарецкий Ю. К. Статика и динамика грунтовых плотин / Ю. К. Зарецкий, В. Н. Ломбардо. – М.: Энергия, 1983. – 256 с.
8. Соколовский В. В. Теория пластичности / В. В. Соколовский. – М.: Гостехтеориздат, 1950. – 243 с.
9. Арутюнян Н. Х. Плоская контактная задача теории пластичности со степенным упрочнением материала / Н. Х. Арутюнян. // Известия АН Армянской ССР. Серия физико-технических наук. – 1959. – Вып. 2. – С. 176–188.
10. Николаевский В. Н. Современные проблемы механики грунтов / В. Н. Николаевский // Определяющие законы механики грунтов. – М., 1975. – С. 210–227.
11. Скотт Р. Ф. Пластичность и соотношения состояния в механике грунтов / Р. Ф. Скотт // Американское общество гражданских инженеров. Отделение геомеханики. Журнал геотехники. – 1985. – Т. 3, № 5. – С. 215–225.
12. Боткин А. И. Исследование напряженного состояния в сыпучих и связных грунтах / А. И. Боткин // Известия ВНИИГ. – 1939. – Т. 24. – С. 3–41.
13. Винокуров Е. Ф. Итерационный метод расчетов оснований и фундаментов с помощью ЭВМ / Е. Ф. Винокуров. – Минск: Наука и техника, 1968. – 243 с.
14. Зарецкий Ю. К. К расчету ленточных фундаментов на нелинейно-деформируемом неоднородном основании / Ю. К. Зарецкий // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1965. – № 1. – С. 7–10.
15. О совместной работе жестких фундаментов и нелинейно-деформируемого основания / [М. В. Малышев, Ю. К. Зарецкий, В. Н. Широков та ін.] // Труды к VIII международному конгрессу по механике грунтов и фундаментостроению. – М.: Стройиздат, 1973. – С. 97–104.
16. Широков В. Н. Напряженное состояние и перемещения несомого нелинейно-деформируемого грунтового полупространства под круглым жестким штампом / В. Н. Широков, В. И. Соломин, М. В. Малышев, Ю. К. Зарецкий // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1970. – № 1. – С. 2–5.
17. Дорофеев О. А. Математична модель взаємодії елементів машин з дискретним середовищем та методи її реалізації : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 01.05.02 "Математичне моделювання та обчислювальні методи" / О. А. Дорофеев. – Тернопіль, 2004. – 20 с.
18. Ковтун В. В. Исследование характера нелинейных физических зависимостей несвязных грунтов / В. В. Ковтун // Основания и фундаменты. – Киев: Будівельник, 1975. – Вып. 8. – С. 64–70.
19. Шихиев Ф. М. Об обобщенном напряженном состоянии грунтов / Ф. М. Шихиев // Гидротехника. – 1962. – № 2. – С. 17–20.
20. Гениев Г. А. Об одном варианте теории сыпучей среды / Г. А. Гениев // Строительная механика и расчет сооружений. – 1965. – Т. 10, № 2. – С. 157–165.
21. Крыжановский А. Л. Эффективность расчета оснований с учетом нелинейных деформационных свойств грунтов / А. Л. Крыжановский, А. С. Чевикин, О. В. Куликов // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1975. – № 5. – С. 37–40.
22. Столяров В. Г. Деформируемость не скальных грунтов / В. Г. Столяров // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1981. – № 5. – С. 29–31.
23. Седов Л. И. Механика сплошной среды / Л. И. Седов. – М.: Наука, 1970. – Т. 2. – 578 с.
24. Drucker D. C. Solid Mechanics and Plastic Analysis of Limit Design / D. C. Drucker, W. Prager // Quarterly of Applied Mathematics. – 1952. – Vol. 10. – № 2. – P. 157–165.
25. Roscoe K. H. The Influence of Strains in Soil Mechanics / K. H. Roscoe // Geotechnique. – 1970. – Vol. 20. – № 2. – P. 129–170.
26. Ковтун В. В. Основи механіки дискретних матеріалів : монографія / В. В. Ковтун, О. А. Дорофеев. – Хмельницький: ХНУ, 2018. – 131 с.

References

1. Kandaurov I. I. *Mehanika Zernistyh Sred I Ee Primenenie V Stroitel'stve* / I. I. Kandaurov. – L., M.: Stroyizdat, 1966. – 318 S.
2. Myuler R. A. K staticheskoy teorii raspredeleniya napryazheniy v zernistom gruntovom osnovanii / R. A. Myuler // *Osnovaniya, fundamenti i mehanika gruntov*. – 1962. – № 4. – S. 10–12.
3. Bugaev V. T. Kinematika chastichek sypuchey sredy pri smeschenii ograzhdeniya / V. T. Bugaev, V. V. Kovtun // *Inzhenernye sooruzheniya i oborudovanie morskikh portov*: sb. nauch. tr. – M.: Morteinformreklama, 1985. – S. 11–15.
4. Haponov V. V. Pro peremishchennia v sypkykh gruntakh, yaki perebuvaui u hranychnii rinvovazi / V. V. Haponov // *Prykladna mekhanika*. – 1959. – T. 2. Vyp. 1. – S. 52–61.
5. Frel'ih O. K. Raspredelenie davleniya v grunte / O. K. Frel'ih. – M.: Izdatel'stvo narkomhoza RSFSR, 1938. – 188 s.
6. Malyshev V. M. Raspredelenie napryazheniy i deformatsiy v nelineynoy deformiruemom osnovanii, nagruzhenom sosredotochennoy siloy / V. M. Malyshev // *Osnovaniya, fundamenti i mehanika gruntov*. – 1963. – № 3. – S. 7–11.
7. Zareckiy Yu. K. Statika i dinamika gruntovykh plotin / Yu. K. Zareckiy, V. N. Lombardo. – M.: Energiya, 1983. – 256 s.
8. Sokolovskiy V. V. Teoriya plastichnosti / V. V. Sokolovskiy. – M.: Gostehizdat, 1950. – 243 s.
9. Arutyunyan N. H. Ploskaya kontaktnaya zadacha teorii plastichnosti so stepennym uprochneniem materiala / N. H. Arutyunyan. // *Izvestiya AN Armyanskoy SSR. Seriya fiziko-tekhnicheskikh nauk*. – 1959. – Vyp. 2. – S. 176–188.
10. Nikolaevskiy V. N. Sovremennyye problemy mehaniki gruntov / V. N. Nikolaevskiy // *Opredeleyayushchie zakony mehaniki gruntov*. – M., 1975. – S. 210–227.
11. Skott R. F. Plastichnost' i sootnosheniya sostoyaniya v mehanike gruntov / R. F. Skott // *Amerikanskoe obschestvo grazhdanskikh inzhenerov. Otdelenie geomekhaniki. Zhurnal geotekhniki*. – 1985. – T. 3, № 5. – S. 215–225.
12. Botkin A. I. Issledovanie napryazhennogo sostoyaniya v sypuchih i svyaznykh gruntah / A. I. Botkin // *Izvestiya VNIIG*. – 1939. – T. 24. – S. 3–41.
13. Vinokurov E. F. Iteratsionnyy metod raschetov osnovaniy i fundamentov s pomosh'yu EVM / E. F. Vinokurov. – Minsk: Nauka i tekhnika, 1968. – 243 s.
14. Zareckiy Yu. K. K raschetu lentochnykh fundamentov na nelineynoy deformiruemom neodnorodnom osnovanii / Yu. K. Zareckiy // *Osnovaniya, fundamenti i mehanika gruntov*. – 1965. – № 1. – S. 7–10.
15. O sovmestnoy rabote zhestkikh fundamentov i nelineynoy deformiruemogo osnovaniya / [M. V. Malyshev, Yu. K. Zareckiy, V. N. Shirokov ta in.] // *Trudy k VIII mezhdunarodnomu kongressu po mehanike gruntov i fundamentostroeniya*. – M.: Stroyizdat, 1973. – S. 97–104.
16. Shirokov V. N. Napryazhennoe sostoyanie i peremescheniya vesomogo nelineynoy deformiruemogo gruntovogo poluprostranstva pod kruglym zhestkim shtampom / V. N. Shirokov, V. I. Solomin, M. V. Malyshev, Yu. K. Zareckiy // *Osnovaniya, fundamenti i mehanika gruntov*. – 1970. – № 1. – S. 2–5.
17. Dorofiev O. A. Matematychna model vzaiemodii elementiv mashyn z diskretnym seredovyshechem ta metody yii realizatsii: avtoref. dys. na zdobuttia nauk. stupenia kand. tekhn. nauk: spets. 01.05.02 "Matematychni modeliuvannia ta obchysluvalni metody" / O. A. Dorofiev. – Ternopil, 2004. – 20 s.
18. Kovtun V. V. Issledovanie haraktera nelineynykh fizicheskikh zavisimostey nesvyaznykh gruntov / V. V. Kovtun // *Osnovaniya i fundamenti*. – Kiev: Budivelnik, 1975. – Vyp. 8. – S. 64–70.
19. Shihiev F. M. Ob obobshchennom napryazhennom sostoyanii gruntov / F. M. Shihiev // *Gidrotehnika*. – 1962. – № 2. – S. 17–20.
20. Geniev G. A. Ob odnom variante teorii sypuchey sredy / G. A. Geniev // *Stroitel'naya mehanika i raschet sooruzheniy*. – 1965. – T. 10, № 2. – S. 157–165.
21. Kryzhanovskiy A. L. Effektivnost' rascheta osnovaniy s uchedom nelineynykh deformatsionnykh svoystv gruntov / A. L. Kryzhanovskiy, A. S. Chevikin, O. V. Kulikov // *Osnovaniya, fundamenti i mehanika gruntov*. – 1975. – № 5. – S. 37–40.
22. Stolyarov V. G. Deformiruemost' neskal'nykh gruntov / V. G. Stolyarov // *Osnovaniya, fundamenti i mehanika gruntov*. – 1981. – № 5. – S. 29–31.
23. Sedov L. I. *Mehanika sploshnoy sredy* / L. I. Sedov. – M.: Nauka, 1970. – T. 2. – 578 s.
24. Drucker D. C. *Solid Mechanics and Plastic Analysis of Limit Design* / D. C. Drucker, W. Prager // *Quarterly of Applied Mathematics*. – 1952. – Vol. 10. – № 2. – P. 157–165.
25. Roscoe K. H. The Influence of Strains in Soil Mechanics / K. H. Roscoe // *Geotechnique*. – 1970. – Vol. 20. – № 2. – P. 129–170.
26. Kovtun V. V. *Osnovy mekhaniky diskretnykh materialiv: monohrafiya* / V. V. Kovtun, O. A. Dorofiev. – Khmelnytskyi: KhNU, 2018. – 131 s.

Рецензія/Peer review : 20.5.2019 р.

Надрукована/Printed : 2.6.2019 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Харжевський В.О.

Г.А. БІЛОУС, Т.К. СКРИПНИК, Н.К. МЕДВЕДЧУК
Хмельницький національний університет

РОЗБИТТЯ 3D-ОБ'ЄКТІВ НА ТЕТРАЕДРИ ІЗ ЗАДАНИМ СТУПЕНЕМ ДИСКРЕТНОСТІ

В роботі визначається проблема із методами триангулювання 3D-об'єктів та пропонується інформаційна технологія розбиття із заданим ступенем дискретності контурного 3D-об'єкта на тетраедри, особливістю якої є робота з STL-файлами тривимірних об'єктів як вхідних та вихідних даних, що ґрунтується на алгоритмі масштабування заданої неструктурованої розрахункової трикутної сітки.

Ключові слова: триангуляція, STL-формат, тетраедри, 3D-об'єкт, метод скінченних елементів, дискретність контурної моделі.

H.A. BILOUS, T.K. SKRYPNYK, N.K. MEDVEDCHUK
Khmelnytskyi National University

FRAGMENTATION OF 3D-OBJECTS ON TETRAHEDRONS WITH TARGETED DEGREE OF DISCRETENESS

Abstract - Three-dimensional geometry in leading 3D CAD systems is described by surfaces of the high order, and when being triangulated the surface of the model is divided into small triangles – facets. Currently, large number of research and commercial software packages are developed on the basis of one or another iterative method that implement the building of grids in automatic mode. However, only some software makes it based on STL-files, and even more rarely similar software packages support two types of STL-files. That's why the work is aimed to develop the information technology of the distribution with a given degree of discreteness of the contour 3D model STL into the tetrahedron. To confirm the effectiveness of information technology, an experimental software product was created that is used to generate a tetrahedron's grid based on data from STL-files. Within the framework of the proposed information technology, an algorithm for scaling a given unstructured calculated triangular grid has been developed.

Keywords: triangulation, STL-format, tetrahedron, 3D-object, finite element method, discreteness of contour model

Вступ

Для вирішення широкого кола задач моделювання, візуалізації та проектування виробів у сфері механічної інженерії часто застосовується метод скінченних елементів. Метод скінченних елементів є інженерним аналізом, що полягає в апроксимації суцільного середовища з нескінченно великими числами ступенів свободи сукупністю елементів, що мають скінченне число ступенів свободи, й між цими елементами встановлюється взаємозв'язок [1].

При використанні методу кінцевих елементів у інформаційних технологіях є проблема роботи із файлами STL-формату. STL (StereoLithography) є «мозаїчним» форматом, в якому для представлення форми цифрової 3D-моделі використовується послідовність трикутників (фасетів). STL-формат використовується в сфері прототипування, а саме в стереолітографії, у ньому міститься інформація, що застосовується в розробці різних об'ємних деталей, які можна навіть роздрукувати на 3D-принтері

Тривимірна геометрія в провідних 3D CAD-системах описується поверхнями високого порядку, а при триангуляції поверхня моделі розбивається на маленькі трикутники – фасети. Кожен фасет описується чотирма наборами даних: координати X, Y, Z кожної з трьох вершин і нормальний вектор, який описує орієнтацію фасета, вказуючи назовні моделі [2].

Триангуляцією тривимірного об'єкта є його розбиття на тетраедри, що розташовуються один біля одного. Існує два класи методів тривимірної триангуляції: прямі та ітераційні. Ітераційні мають достатню універсальність і тому, на відміну від прямих, можуть бути використані для триангуляції об'єктів довільного вигляду, проте вони характеризуються споживанням ресурсів і більш трудомісткою реалізацією методу в конкретному алгоритмі.

Сітки, побудовані ітераційними методами, як правило, неструктуровані й неоднорідні. Неструктурованість обумовлена тим, що топологія сітки формується в процесі побудови, і тому може варіюватися навіть в межах однієї підобласті. З цієї ж причини однорідність може виникнути тільки випадково. Оскільки перед побудовою сітки нічого не можна сказати про її майбутню структуру, не можна гарантувати і її якості. Часто побудовану сітку можна істотно поліпшити за допомогою одного з численних методів оптимізації. Цією можливістю зазвичай не нехтують, благо що час, що витрачається на оптимізацію, як правило, істотно менше часу, що витрачається на побудову [3].

В даний час розроблено велику кількість дослідницьких та комерційних програмних пакетів на основі того чи іншого ітераційного методу, що реалізують побудову сіток (частково або повністю) в автоматичному режимі [4]. Більшість з них ґрунтуються на використанні критерію Делоне. Тобто, трикутна сітка на площині відповідає критерію Делоне, якщо всередину кола, описаного навколо будь-якого трикутника, не потрапляють ніякі інші вузли цієї сітки. Проте лише деяке програмне забезпечення, що реалізує 3D-триангуляцію, робить це на основі файлів STL-формату. Ще рідше подібні програмні пакети підтримують два типи STL-файлів, дані у яких можуть зберігатися як в текстовому ASCII-форматі, так і в двійковому вигляді (бінарний формат), що забезпечує більшу швидкодію.

Тому *метою роботи* є розробка інформаційної технології розбиття із заданим ступенем

дискретності контурної 3D-моделі STL на тетраедри.

Основна частина

Загальну схему інформаційної технології для створення сітки тетраедрів із даних файлу STL-формату представлено на рисунку 1.

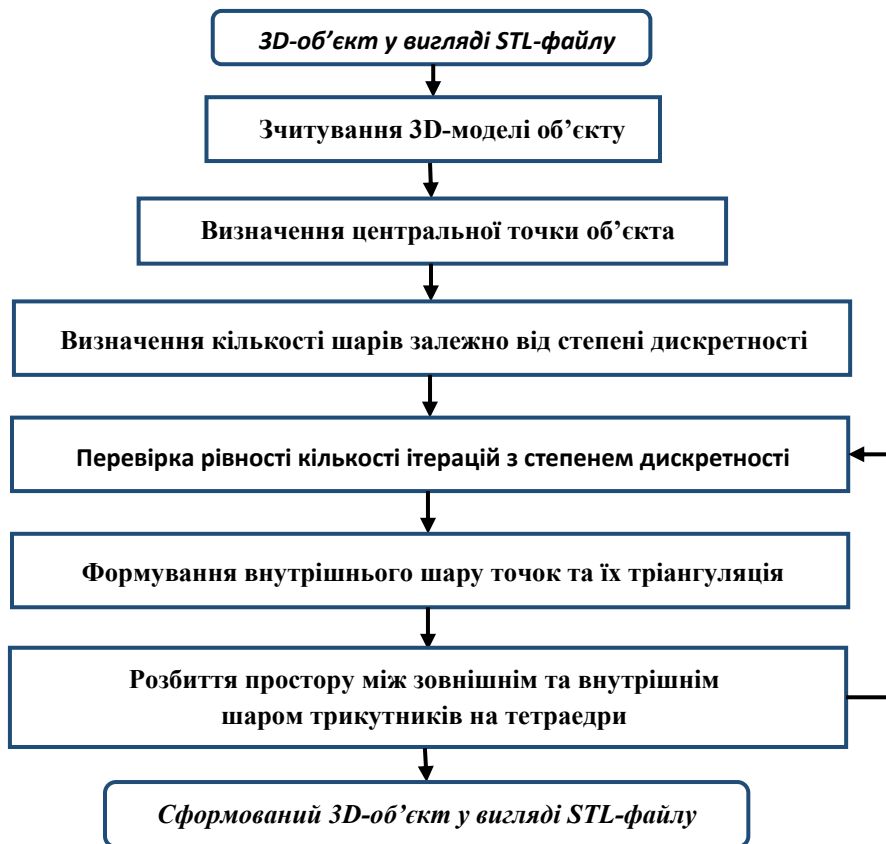


Рис. 1. Схема інформаційної технології розбиття контурної 3D-моделі STL на тетраедри

В рамках запропонованої інформаційної технології, спочатку вводяться вхідні дані через командний рядок: ім'я вхідного файлу в STL-форматі, тип STL-файлу, ім'я вихідного STL-файлу, що містить сітку тетраедрів, та параметри розбиття (ступінь дискретності). Далі зчитується 3D-об'єкт, який розбивається на тетраедри із заданим ступенем дискретності. Це відбувається за алгоритмом масштабування заданої неструктурованої розрахункової трикутної сітки. Для цього спочатку знаходяться координати точки центру фігури, в яку буде переноситися центр системи координат. Формується внутрішній шар точок, який триангулюється і таким чином будується внутрішній триангульований шар. Простір між зовнішнім і внутрішнім шаром розбивається на тетраедри. В результаті поєднання зовнішнього й внутрішнього шарів трикутників формуються трикутні призми, які розбиваються на тетраедри. На останній ітерації крайній внутрішній шар з'єднується з центром фігури, створюючи таким чином шар із тетраедрів.

Вихідний файл зберігається в ASCII-форматі з заданим ім'ям файлу. STL-файли з вхідними даними і результатами створення сітки тетраедрів можна переглядати за допомогою 3D-редакторів з підтримкою STL «MeshLab» або «3D Viewer for Google Chrome».

Для підтвердження ефективності інформаційної технології було створено експериментальний програмний продукт, який застосовується для генерування сітки тетраедрів за даними файлів STL-формату. Даний програмний продукт базується на запропонованій інформаційній технології та алгоритму масштабування заданої неструктурованої розрахункової трикутної сітки, яка зчитується з вхідного STL-файлу. Запропонований алгоритм дозволяє розбити 3D-об'єкт, заданий замкнутим набором трикутних граней на тетраедри (кінцева сітка).

Розроблений додаток складається з наступних модулів (рисунок 2):

1. Модуль інтерфейсу користувача. Даний модуль реалізується у класі Program.
2. Модуль інтерфейсів додатку. Модуль містить у собі інтерфейси класів модуля роботи з STL-файлами та класу модуля розрахунків:
 - IstlReader – інтерфейс, який визначає загальні властивості методів читання STL-файлів в залежності від типу файлу (бінарний або ASCII);
 - IstlWriter – інтерфейс, що визначає клас запису в файл STL-формату (ASCII-тип);
 - ItetrahedralMeshes – інтерфейс, який визначає алгоритм масштабування заданої неструктурованої розрахункової трикутної сітки і розбивки фігури на тетраедри.

3. Модуль структур. Даний модуль відображено у наступних структурах даних:
- StlVector – описує точку з координатами X, Y, Z;
 - StlTriangle – описує структуру трикутника, що складається з трьох вершин і вектора нормалі.
4. Модуль роботи з STL-файлами. Реалізує читання даних із двох типів файлів даного формату та запис вихідних даних:
- StlReader – клас реалізує інтерфейс IstlReader. Містить два методи читання файлів STL-формату і метод визначення імені користувача;
 - StlWriter – клас реалізує інтерфейс IstlWriter. Містить метод запису файлів STL-формату.
5. Модуль розрахунків. Представлений класом TetrahedralMeshes, який реалізує інтерфейс ItetrahedralMeshes. Клас містить методи реалізації алгоритму масштабування заданої фігури у вигляді сітки трикутників і розбивки фігури на тетраедри.

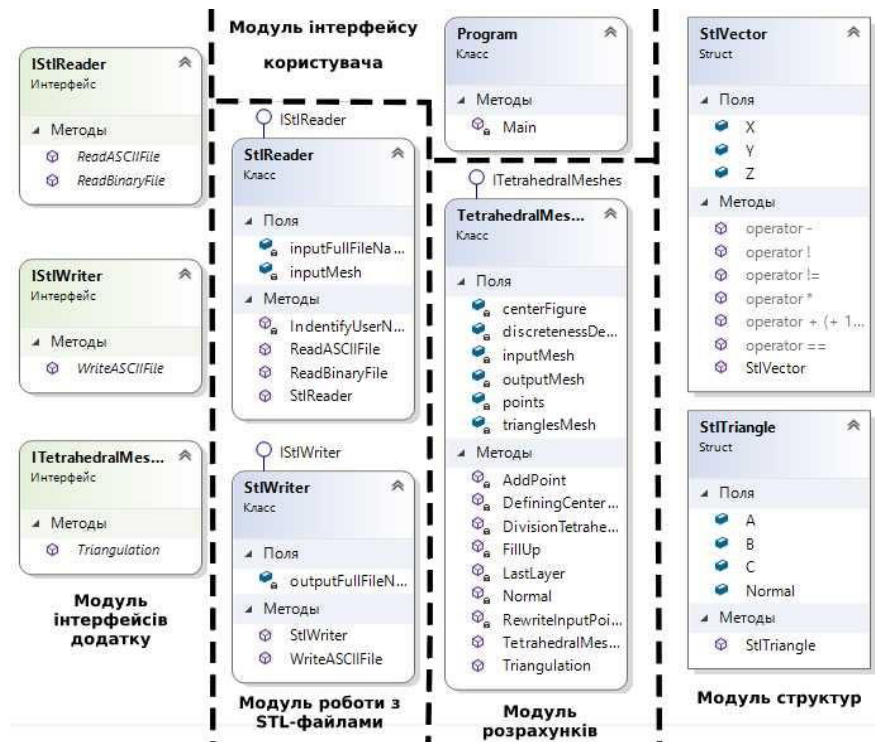


Рис. 2. Діаграма класів додатку

Інтерфейсом користувача для роботи з додатком є консоль. Для запуску побудови сітки необхідно ввести такі параметри як: STL-файл для зчитування поверхні, тип STL-файлу (бінарний або ASCII), назва файлу для запису створеної сітки, ступінь дискретності.

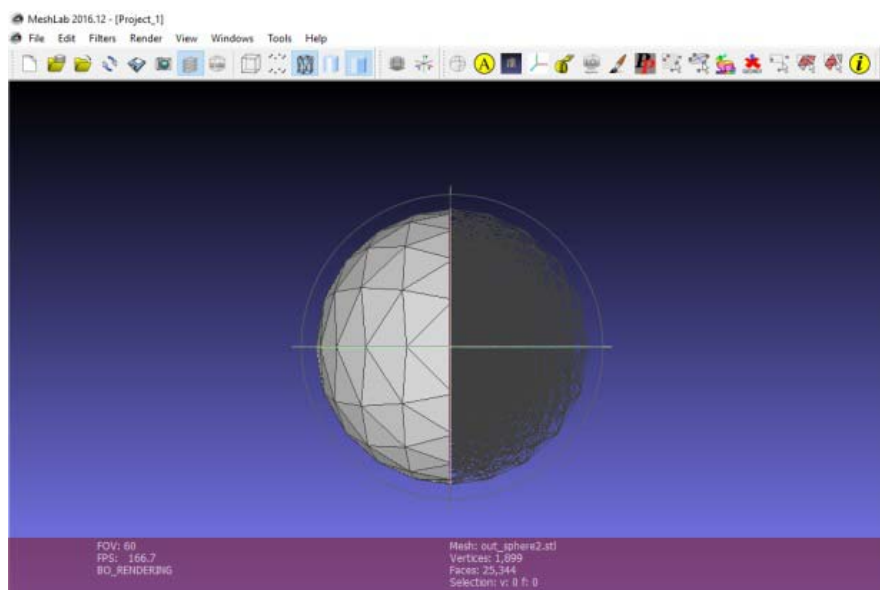


Рис. 3. Результат роботи додатку з генерування сітки тетраедрів

Результатом виконання програми є STL-файл, який містить у собі сітку трикутників, що формують

тетраедри (рисунок 3).

Висновки

Аналіз використання методу кінцевих елементів у інформаційних технологіях визначив, що існує проблема роботи із файлами STL-формату, що містять у собі моделі 3D-об'єктів. Тому запропоновано інформаційну технологію розбиття із заданим ступенем дискретності контурного 3D-об'єкта на тетраедри, особливістю якої є саме робота з STL-файлами тривимірних об'єктів як вхідних та вихідних даних. В рамках запропонованої інформаційної технології, було розроблено алгоритм масштабування заданої неструктурованої розрахункової трикутної сітки.

Розглянуто роботу програмного продукту на основі даної інформаційної технології, його алгоритмічну складову та структуру. Встановлено, що даний програмний продукт дійсно дозволяє формувати сітку тетраедрів для трьохвимірних геометричних тіл обертання, що підтверджує ефективність та функціональність запропонованої інформаційної технології. Подальші дослідження спрямовані на покращення алгоритму задля триангулювання складних 3D-об'єктів, що містять у собі заглибини та випуклості різної складності: тора, моделей автомобілів, будівель, тощо.

Література

1. Зенкевич О. К. Метод скінченних елементів у техніці / О. К. Зенкевич // Науковий журнал «Світ», Москва, 1975, №6. – С.541.
2. Що таке формат файлу STL. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://3dnetprint.com/blog/stl-file-what-is-it>
3. Development and Implementation of Algorithms for Constrained Volume Triangulations: Iterative Algorithms [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://keldysh.ru/papers/2006/rep09/rep2006_09.html
4. A Quality Tetrahedral Mesh Generator and a 3D Delaunay Triangulator [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://wias-berlin.de/software/tetgen/>

References

1. Zenkevych O. K. Finite Element Method in Engineering / O. K. Zenkevych // Naukovyy zhurnal „World”, 1975, №6. – P.541.
2. What is the format of the STL file: <https://3dnetprint.com/blog/stl-file-what-is-it>
3. Development and Implementation of Algorithms for Constrained Volume Triangulations: Iterative Algorithms: http://keldysh.ru/papers/2006/rep09/rep2006_09.html
4. A Quality Tetrahedral Mesh Generator and a 3D Delaunay Triangulator: <http://wias-berlin.de/software/tetgen/>

Рецензія/Peer review : 16.5.2019 р.

Надрукована/Printed : 2.6.2019 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Сорокатиї Р.В.

О.К. ЯНОВИЦЬКИЙ, Л.Е. БАЙДИЧ
Хмельницький національний університет

МЕТОД ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ГАЛЬВАНІЧНИХ ПОКРИТТІВ НА ДРУКОВАНИХ ПЛАТАХ

Метод інтенсифікації нанесення гальванічних покриттів на поверхню двосторонніх друкованих плат з металізацією монтажних отворів полягає в проведенні процесу осадження металу із псевдозрідженого шару неелектропровідних кульок, що забезпечує рівномірність розподілу товщини покриття як на поверхні, так і в отворах друкованих плат, а співудари кульок з поверхнею покриття призводять до пластичної деформації, що полегшує утворення зародків металу покриття, робить дрібну структуру гальванічного осаду, що дозволяє підвищити робочу густину струму та скоротити час нанесення гальванічних покриттів. Інтенсифікація методу гальванічного нанесення покриття забезпечується завдяки використанню неелектропровідних кульок розмірами (діаметром), що перевищують максимальні розміри (діаметр) отворів на 15–30%.

Ключові слова: гальванічне покриття, друковані плати, перехідні отвори, неелектропровідні кульки, псевдозріджений шар.

O.K. YANOVYTSKYI, L.E. BAIDYCH
Khmelnytskyi National University

METHOD OF INTENSIFICATION OF GALVANIC COATINGS ON PRINTED PLATES

The method of intensifying of the application of galvanic coatings on the surface of double-sided printed plates with the metallization of the mounting holes consists in conducting of the process of metal deposition from a pseudo liquefied layer of non-conductive balls, which ensures the uniformity of the thickness distribution of the coating both on the surface and in the holes of the printed plates, and the common kicks of balls with the surface of the coating result to the plastic deformation, which facilitates the formation of the germ of the metal of coating, makes a fine structure of the galvanic siege, which allows to increase the working density current and reduce the time of galvanization. Intensification of the electroplating coating method is ensured by the use of non-conductive balls in sizes (diameters) exceeding the maximum dimensions (diameter) of the apertures by 15–30%. Today's electronic devices require multilayer printed plates using small transition holes for connecting of interlayer conductors in order to increase the density of the layout of the scheme elements. The problem of galvanic coating applying in small diameter holes on printed plates of large thickness is that the concentration of electrolyte solutions that are located in the holes is smaller than at the surface of the printed plate. As a result, the thickness of the obtained coating and its quality are reduced. Certain methods of galvanic coating applying on the printed plates have significant drawbacks: the irregularity of the galvanic coating on the surface and in the holes of the printed plate, the low rate of coating, the addition of expensive impurities in the electrolyte solutions to obtain a shallow crystalline structure of the coatings, the difficulty in partially shielding of the surfaces of products of complex shape with the simultaneous use of ferromagnetic particles, which are in an electrolyte in an equilibrium state.

Key words: galvanic coating, printed plates, transition holes, non-conductive balls pseudo liquefied layer.

Сучасні електронні пристрої потребують використання багатошарових друкованих плат з малими перехідними отворами для з'єднання міжпрошаркових провідників з метою збільшення щільності розміщення елементів схем. Проблема нанесення гальванічних покриттів в отворах малих діаметрів на друкованих платах великої товщини полягає в тому, що концентрація розчинів електролітів, які знаходяться в отворах, менша, ніж біля поверхні друкованої плати. В результаті зменшується товщина отриманого покриття та його якість.

Відомий метод [1] нанесення гальванічних покриттів на друковані плати має суттєві недоліки: нерівномірність гальванічного покриття на поверхні та в отворах друкованої плати, низька швидкість нанесення покриття, додавання дороговартісних домішок до складу розчинів електролітів для одержання мілко кристалічної структури покриттів. Також відомий метод [2], недоліком якого є складність у виконанні часткового екранування поверхонь виробів складної форми з одночасним використанням ферромагнітних частинок, які знаходяться в електроліті у рівноважному стані.

Пропонується інтенсифікація методу нанесення гальванічних покриттів друкованих плат [3] для забезпечення рівномірного розподілу товщини покриття на поверхні і в отворах друкованих плат, який ведеться у псевдозрідженому шарі неелектропровідних кульок, що перевищують максимальні розміри (діаметр) отворів друкованих плат на 15–30%.

Даний метод відрізняється від наведених тим, що гальванічне висадження металу покриття ведуть у псевдозрідженому шарі неелектропровідних частинок, які перевищують на 15–30% максимальний діаметр отворів друкованих плат.

Двосторонні друковані плати розташувались паралельно висхідному потоку електроліту, у рециркулюючий шар кульок, який забезпечує псевдозрідження і заданий оптимальний ступінь розширення шару. Неелектропровідні кульки псевдозрідженого шару, рухаючись в потоці електроліту, забезпечують його інтенсивне перемішування безпосередньо біля поверхні друкованої плати. Співудари кульок з

поверхнею покриття призводять до пластичної деформації, що полегшує утворення зародків металу покриття, робить мілку структуру гальванічного осаду, що дозволяє підвищити робочу густину струму та зменшити час процесу гальванічного нанесення.

Механічна дія кульок псевдозрідженого шару змінює характер електрохімічного процесу, збільшує перенапругу виділення металу покриття, що також суттєво впливає на його структуру. Враховуючи, що двосторонні друковані плати мають металізовані монтажні отвори, розміри кульок псевдозрідженого шару вибирають так, щоб вони перевищували розміри (діаметр) найбільших монтажних отворів на 15–30% з метою недопущення їх попадання (закупорювання) в отвори і включення в структуру осаду. При цьому будь-яка їх механічна дія в монтажних отворах відсутня.

Використання псевдозрідженого шару призводить до прискорення процесу осадження металу як в монтажних отворах, так і росту швидкості осадження металу на поверхні зі співставленими швидкостями без його використання. Для реалізації способу нанесення покриття важливою є необхідність створення плоского висхідного потоку в усьому об'ємі електроліту з середньою швидкістю. Вплив псевдозрідженого шару неелектропровідних кульок на інтенсивність нанесення гальванопокриттів і якість отриманого осаду металу, на двосторонніх друкованих платах, визначається двома факторами: дією швидкості потоку електроліту і частотою (енергією) співударів неелектропровідних кульок з поверхнею, яка обробляється. Зі зростанням швидкості потоку посилюється його внесок в перемішування розчину електроліту, що призводить до вирівнювання його концентрації в усьому об'ємі і збільшення кінетичної енергії співударів частинок з поверхнею покриття. Відповідно зростає ступінь розширення псевдозрідженого шару, зменшується число кульок в одиниці об'єму реакційного простору і частота співударів. Оптимальний вплив псевдозрідженого шару неелектропровідних кульок знаходиться в інтервалі відносних ступенів розширення 1,35–1,55, в так званій області існування щільного шару. Для реалізації даного способу необхідною, обов'язковою умовою є використання кульок, які перевищують максимальні розміри монтажних отворів в друкованих платах. В іншому разі можливе їх включення в осаджений метал по контуру отворів. Також необхідно враховувати, що швидкість потоку розчину електроліту підвищується в квадратичній залежності від росту середнього розміру кристалів осаду. Тому використання кульок, розміри яких перевищують 30%, небажане. В якості матеріалу для створення псевдозрідженого шару використовують матеріали невеликої густини, а саме: скло, пісок, пластмаси.

Приклад. Наносили шар електролітичної міді (кислий електроліт) на двосторонні друковані плати розміром 110x45 мм, які мають монтажні отвори діаметру 0,5–2,0 мм. Час гальванічного покриття, швидкість осадження мідного шару на поверхню друкованих плат і в монтажних отворах наведені в таблиці 1. Матеріалом для створення псевдозрідженого шару слугують кульки скла діаметром 2,15 мм. Ступінь розширення скла – 1,5. Об'ємна доля частинок 45–50 %. Гальванопокриття проводять за кімнатної температури (20°C).

Зовнішній вигляд покриття міддю на поверхні друкованих плат та в монтажних отворах, яке одержане в псевдозрідженому шарі неелектропровідних частинок, відповідає вимогам ГОСТ 9.301-86, ГОСТ 9.302-88. «Покриття металлические и неметаллические. Общие требования и методы контроля». При цьому покриття, які отримали відповідно до ОСТ 107.460092.004.001-86, мають відношення товщини покриття в отворах і на поверхні друкованих плат відповідно (1:2)–(1:35), тоді як покриття, отримані запропонованим способом

м – 1:1,15 відповідно.

Таблиця 1

Розрахунок мідного покриття

№ п/п	Густина струму, А/дм ²	Час покриття, хв.	Середня товщина мідного покриття, мкм		Середня швидкість осадження міді, мкм/хв	
			в монтажних отворах	на поверхні друкованої плати	в монтажних отворах	на поверхні друкованої плати
1	10	5	10	10,1	2,1	2,0
2	10	10	12,2	12,5	1,25	1,25
3	10	15	17	17,5	1,13	1,2
4	10	20	21	21	1,05	1,05
5	15	5	12,5	15,3	2,55	3,02
6	15	10	16	18,5	1,6	1,8
7	15	15	22,5	26,5	1,45	1,65
8	15	20	25	30,1	1,25	1,5

Література

1. Достанко А.П. Технология и автоматизация производства радиоэлектронной аппаратуры : учебник для высших учебных заведений / А.П. Достанко, Ш. М. Чабдарова. – Москва : «Радио и связь», 1989. – С. 254–255.

2. Авторське свідоцтво СССР № 1399377, кл. С 25D5/00. Нанесення гальванічних покриттів на деталі складної форми з частковим екрануванням поверхні, шляхом періодичного контактування з феромагнітними частинками, які знаходяться у зваженому стані і покриті діелектричною оболонкою. – Оpubл. 1988 р.

3. Патент на корисну модель № 133386. Спосіб нанесення гальванічних покриттів на друковані плати / Яновицький О.К., Байдич Л.Е. – опубл. 10.04.2019 р.

References

1. Dostanko A.P. Tehnologiya i avtomatizaciya proizvodstva radioelektronnoy apparatury : uchebnik dlya vysshih uchebnyh zavedeniy / A.P. Dostanko, Sh. M. Chabdarova. – Moskva : «Radio i svyaz'», 1989. – S. 254–255.

2. Avtorske svidotstvo SSSR № 1399377, kl. S 25D5/00. Nanesennia halvanichnykh pokryttiv na etail skladnoi formy z chastkovym ekranuvanniam poverkhni, shliakhom periodychnoho kontaktuvannia z feromahnitnymy chastynkami, yaki znakhodiatsia u zvazhenomu stani i pokryti dielektrychnoiu obolonkoiu. – Opubl. 1988 r.

3. Patent na korysnu model № 133386. Sposib nanesennia halvanichnykh pokryttiv na drukovani platy / Yanovytskyi O.K., Baidych L.E. – opubl. 10.04.2019 r.

Рецензія/Peer review : 25.5.2019 р.

Надрукована/Printed : 2.6.2019 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Мартинюк В.В.

DOI 10.31891/2307-5732-2019-273-3-66-71

УДК 685.34042

І.А. МАНДЗІЮК, К.О. ПРИСЯЖНА

Хмельницький національний університет

ОПТИМІЗАЦІЯ СКЛАДУ МАСТИЛЬНОЇ КОМПОЗИЦІЇ, РОЗРОБЛЕНОЇ НА ОСНОВІ ЯЛОВИЧОГО ЖИРУ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕХНОЛОГІЇ РЕЦИКЛІНГУ ПОЛІЕТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТУ

В роботі надано інформацію щодо оптимізації композиції мастильного матеріалу, синтезованого на основі яловичого жиру з використанням технологій рециклінгу поліетилентерефталату. Визначено технологічні фактори впливу на процес синтезу: температура, співвідношення жиру і гліцеролу, типу катализатора та його концентрації. В якості критеріїв відгуку були вибрані динамічна в'язкість, схильність до окиснення. Визначено найліпші комбінації якісних ознак для розробки технології синтезу з використанням греко-латинського квадрата. Оптимальний склад мастила знаходили, використовуючи симплекс-планування. В якості критеріїв відгуку обрані наступні показники: пляма зношування кульки, критичне навантаження, навантаження зварювання. Експериментально підтверджено, що триботехнічні показники розробленого оптимального складу переважають триботехнічні показники деяких промислових мастильних матеріалів.

Ключові слова: рециклінг, мастило, гліцероліз, оптимізація, "зелена трибологія".

I. A. MANDZIUK, K. O. PRYSIAZHNA

Khmelnyskyi National University

OPTIMIZATION OF THE COMPOSITION OF PLASTIC GREASE MADE ON THE BASIS OF BEEF TALLOW USING THE TECHNOLOGY OF RECYCLING POLYETHYLENE TEREPHTHALATE

The paper provides information on optimizing the composition of the lubricant material synthesized on the basis of beef fat using recycled polyethylene terephthalate technologies. The technological factors of influence on the synthesis process are determined: temperature, ratio of fat and glycerol, type of catalyst and its concentration. As criteria of response were chosen: dynamic viscosity, propensity to oxidation, change in viscosity from temperature at a shear rate of displacement 1333 s^{-1} . The best combination of qualitative features for the development of synthesis technology using the Greek-Latin square has been determined. The optimal composition of the lubricant was found using simplex scheduling. The following indicators were selected as response criteria: spot wearing ball, critical load, welding load. It has been experimentally confirmed that tribotechnical indices of the developed optimal composition are dominated by tribotechnical indices of some industrial lubricants.

Keywords: recycling, lubricant, glycerolysis, optimization, "green tribology".

Вступ

В даний час український ринок мастильних матеріалів динамічно розвивається. На ньому представлено близько 180 різних брендів. При цьому частка вітчизняних виробників становить не більше 10 % [1]. Такий низький відсоток виробництва та використання можна пояснити декількома причинами:

- дефіцит вихідної сировини (синтетична складова мастильних матеріалів є повністю імпортованою);
- недостатній рівень інтеграції українського виробництва у світове, що не дозволяє українській продукції отримати відповідні іноземні сертифікати, для покращення просування бренду на ринку паливно-мастильних матеріалів;
- підвищення вимог щодо екологічності, ефективності використання, частоти заміни у вузлах тертя.

Більшість робіт присвячені вдосконаленню рецептури мастил, оптимізації складу за рахунок введення різноманітних присадок для надання певних властивостей. Проте досліджень з розробки абсолютно нової власне базової основи мастил, проведено досить мало.

Відомо, що будь-яка система взаємодіє з навколишнім середовищем, обмінюючись енергією та матеріальними ресурсами, в тому й числі трибологічна система. За даними [2], збитки від процесів зношування, тертя та корозії поверхонь складають понад 6 % від ВВП лише в США, що становить 900 млрд доларів на рік. Вихід з ладу устаткування та обладнання призводить не лише до матеріальних збитків, але й до значного навантаження на навколишнє середовище. Захист навколишнього середовища є однією з найбільших глобальних проблем людства. Багато наукових досліджень в сфері трибології проведенні на стику різних дисциплін, зокрема інженерії, хімії, біології тощо. Так з'явилася нова міждисциплінарна наука, а відповідно і новий напрямок досліджень – "зелена трибологія", що поєднує вирішення інженерних і екологічних завдань одночасно.

Дослідження у сфері "зеленої трибології" проводяться за наступними напрямками:

- розробка трибологічних технологій, які імітують живу природу (біоміметика) [2];
- контроль тертя та зношування, що приводить до зменшення втрат матеріалів та енергії [3];
- модифікація трибологічних "зелених" систем – вітрових турбін, сонячних панелей тощо [4];

- розробка екологічно безпечних мастильних матеріалів [5–7].

Впроваджуючи принципи “зеленої трибології” можна досягнути пом’якшення антропогенного впливу на кліматичні зміни, підвищити безпеку навколишнього середовища для людського суспільства.

Експериментальна частина

В якості вихідної основи мастильних матеріалів розглядали напівпродукти-рециклати, синтезовані за методикою рециклінгу поліетилентерефталатних відходів на кафедрі хімії та хімічної інженерії, під керівництвом Мандзюка І. А. [8–12].

Реакцію синтезу базової основи, де відбувається процес прищеплення фрагменту ланки синтетичного полімеру до молекули жиру, можна зобразити за наступною схемою:

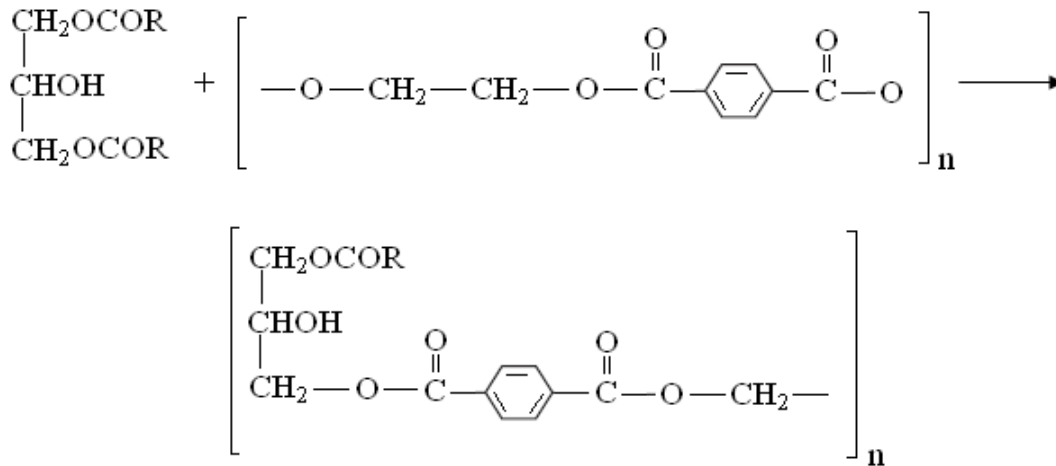


Рис. 1. Взаємодія ацилгліцеролу природного жиру та поліетилентерефталату

Для оптимізації технологічних режимів синтезу були застосовані методи математичного планування та оптимізації [13]. З метою знаходження оптимальних характеристик використовували симплекс-планування.

Технологічними факторами впливу є температура, співвідношення жиру і гліцеролу, типу каталізатора та його концентрації.

Фактори впливу кількісні:

x_1 – співвідношення жир : гліцерол (м.ч.): 1:1; 1:2; 1:3;

x_2 – температура процесу переробки відходів ПЕТФ, °С: 200, 230, 250;

x_3 – тип антиоксиданту: А – IrganoxL 06, В – IrganoxL109, С – IrganoxL 64;

x_4 – концентрація каталізатору, рівні: α – 0,1 %, β – 0,3 %, γ – 0,5 %.

В якості критеріїв відгуку були вибрані: динамічна в’язкість [мПа·с] при 50 °С і 1333 с⁻¹; схильність до окиснення (Art), яку розраховували за зміною в’язкості від температури при 1333 с⁻¹ [14].

На першому етапі дослідження важливим є знаходження найліпших комбінацій якісних ознак (таблиця 1) для розробки технології синтезу з використанням плану дисперсійного аналізу – греко-латинського квадрата – 3х3.

Таблиця 1

План експерименту

Фактор X_2		Фактор X_1		
		Співвідношення жир: гліцерол, м.ч.		
		1:1	1:2	1:3
Температура синтезу, °С	200	A, α	B, β	C, γ
	230	B, γ	C, α	A, β
	250	C, β	A, γ	B, α

Результати експериментальних даних наведені у таблицях 2 та 3.

Таблиця 2

Результати експерименту при дослідженні динамічної в’язкості продуктів синтезу (мПа·с)

Фактор X_2		Фактор X_1		
		Співвідношення жир: гліцерол, м.ч.		
		1:1	1:2	1:3
Температура синтезу, °С	200	44,8	42,7	43,5
	230	69,2	100,8	109,3
	250	86,5	88,6	92,3

Таблиця 3

Результати експерименту при дослідженні схильності до окиснення ($A_{p,n}$) продуктів синтезу

Фактор X_2		Фактор X_1		
		Співвідношення жир: гліцерол, м.ч.		
		1:1	1:2	1:3
Температура синтезу, °C	200	0,16	0,56	0,37
	230	0,17	0,14	0,23
	250	0,22	0,11	0,12

Проведено математичну обробку та дисперсійний аналіз результатів експерименту. Для перевірки відмінностей середніх значень для значимих факторів застосовувався множинний ранговий критерій Дункана, який дозволив за результатами розрахунків сформувати ряди переваг за факторами:

$$X_1: 1 : 2 = 1 : 3 > 1: 1;$$

$$X_2: 250 > 230 > 200;$$

$$X_3: \text{IrganoxL 109} > \text{IrganoxL 64} = \text{IrganoxL 06};$$

$$X_4: 0,3 > 0,5 > 0,1.$$

Значимі ефекти при визначенні впливу на основні показники базових основ мастильних матеріалів чотирьох факторів наведені в таблиці 4.

Таблиця 4

Основні фактори, які впливають на властивості синтезованих продуктів

Фактор	Динамічна в'язкість	Схильність до окиснення
Жир: гліцерол, м.ч.	1:2 = 1:3	1:3 = 1:2
Температура синтезу, °C	230	230
Тип антиоксиданту	Irganox L 109=Irganox L 64 = Irganox L 06	Irganox L 109
Концентрація антиоксиданту, %	0,3	0,3

Дисперсійний аналіз, з використанням греко-латинських квадратів, дав можливість здійснити відсіювання малоефективних якісних факторів [12]. Побудовані ряди переваг дозволяють обмежити кількість антиоксидантів, визначити базові значення технологічних факторів, за необхідності – подальшу оптимізацію складу мастильних матеріалів.

Оптимальний склад мастила знаходили, використовуючи симплекс-планування [13]. Важливою перевагою симплекс-планування є можливість успішного використання методу, коли потрібно враховувати одночасно декілька критеріїв оптимізації (при розв'язанні компромісних задач).

Для побудови робочої матриці задаємо значення факторів у нульовій точці (нульовий рівень) та інтервали варіювання фактору, таблиця 5.

Таблиця 5

Значення нульового рівня та інтервалу варіювання факторів (в м.ч.) на 100 м.ч. основи

Фактор	Нульовий рівень факторів ($X_i = 0$)	Інтервал варіювання факторів ϵ
X_1 – кількість загусника, м.ч.	10	3
X_2 – кількість пакета присадок Irgalube 2030, м.ч.	0,5	0,15
X_3 – кількість MoS_2 , м.ч.	4	1
X_4 – кількість CuO , м.ч.	0,8	0,15

Для чотирьох факторів переформатована матриця вихідного симплекса з відповідними координатами за факторами представлена у таблиці 6.

Таблиця 6

Матриця координат вихідного симплекса

Вершини вихідного симплекса	X_1	X_2	X_3	X_4
1	-0,790	-0,457	-0,323	-0,250
2	0,790	-0,457	-0,323	-0,250
3	0	0,914	-0,323	-0,250
4	0	0	0,969	-0,250
5	0	0	0	1,00

Робоча матриця у натуралізованих факторах вихідного синтезу наведена у таблиці 7.

Таблиця 7

Робоча матриця

Вершини вихідного симплекса	X_1 , м.ч.	X_2 , м.ч.	X_3 , м.ч.	X_4 , м.ч.
1	7,63	0,43	3,68	0,76
2	12,37	0,43	3,68	0,76
3	10	0,64	3,68	0,76
4	10	0,5	4,97	0,76
5	10	0,5	4	0,8

В якості критеріїв відгуку вибрані наступні триботехнічні показники:

- пляма зношування кульки при 196 Н навантаження (d_1);
- критичне навантаження $P_{кр}$, Н (d_2);
- навантаження зварювання $P_{зв}$, Н (d_3).

Кожний з цих показників розглядався, як одна із складових комплексного критерію, поєднаних в один узагальнений за функцією бажаності.

За робочою матрицею (табл. 7) приготовлено п'ять складів мастильних матеріалів, триботехнічні показники яких досліджували на ЧШМ-1. За трьома частковими, вище зазначеними критеріями, розраховували узагальнений критерій D для кожного з досліджених складів мастил. При цьому вирішувалась компромісна задача, оскільки для часткового критерію d_1 знаходили мінімум функції відгуку, а для часткових критеріїв d_2 та d_3 – максимум. Склад мастила з найменшим абсолютним значенням узагальненого критерію відкидали і розраховували новий склад дзеркально відображеної точки за методикою.

Для знаходження оптимального складу мастила на основі яловичого жиру знадобилось дослідити 13 складів мастильних матеріалів. Оптимальний склад розробленого консистентного мастила та його характеристики наведено у таблицях 8–9 відповідно.

Таблиця 8

Оптимальний склад

Компонент	Масова частка
Базова основа ГЯ 1,2-25/75	100 м.ч.
Загусник – натрій стеарат	8,56
Присадка Irgalube 2030	0,48
MoS ₂	4,12
CuO	0,92

Таблиця 9

Характеристики оптимального складу розробленого змащувального матеріалу

Показник	Значення показника
Температура краплепадіння, °С	165±13
Динамічна в'язкість, мПа·с (при 50 °С)	2300±90
Показник зношування, мм	0,31±0,03
Критичне навантаження, Н	900±70
Навантаження зварювання, Н	>3000
Коефіцієнт тертя	0,08±0,01

Для порівняння наведемо основні характеристики промислових мастильних матеріалів, таблиця 10.

Таблиця 10

Основні експлуатаційні показники промислових мастильних матеріалів

Показник	Значення показників для промислових мастильних матеріалів		
	Літол-24	ЦИАТИМ-201	Divinol Fett R2
Температура краплепадіння, °С	185	175	130
Динамічна в'язкість, мПа·с (при 50 °С)	2340	1710	1530
Показник зношування, мм	1	0,89	0,87
Критичне навантаження, Н	657	696	519
Навантаження зварювання, Н	1235	1303	1235
Коефіцієнт тертя	0,17	0,2	0,2

Висновки

Отримано оптимальний склад мастильної композиції на основі яловичого жиру з використанням технології рециклінгу поліетилентерефталату, з покращеними антифрикційними, протизносними та в'язкісними характеристиками. Так, показник тертя в порівнянні з промисловими мастилами покращився в середньому на 60%, показник зношування приблизно – на 67 %, критичне навантаження – на 30 %, значення навантаження зварювання також підвищилося майже на 60 %. Підвищене значення динамічної в'язкості також свідчить про можливість мастильного матеріалу витримувати більші швидкості деформації зсуву, а оптимальний вміст загусника дозволяє значно підвищити температуру краплепадіння.

Література

1. Лисица З. Украинский рынок смазочных материалов на 90% состоит из импортеров [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.epravda.com.ua/press/2011/07/4/290727/>
2. Singh R. A. Biomimetics: The science of imitating nature / R. A. Singh, E. S. Yoon, R. L. Jackson // *Tribology & Lubrication Technology*. – 2009. – Vol. 65. – № 2. – P. 40–47.
3. Szargut J. Exergy Method: Technical and Ecological Applications / J. Szargut. – Southampton : WIT Press, 2004. – 222 p.
4. Afgan N. H. Energy system assessment with sustainability indicators / N. H. Afgan, M. G. Carvalho, N. V. Hovanov // *Energy Policy*. – 2000. – Vol. 28. – № 9. – P. 603–612.
5. Декл. патент на корисну модель № 110856 Україна, МПК7 C10M 107/04, C10M 101/00, C11C 3/06, C10N 40/02. Склад консистентного мастила / І. А. Мандзюк, К. О. Присяжна ; заявник і патентовласник Хмельницький національний університет. – № u201603572 ; заявл. 04.04.2016 ; опубл. 25.10.2016, Бюл. № 20.
6. Nosonovsky M. Green tribology: Principles, research areas and challenges / M. Nosonovsky, B. Bhushan // *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. – 2010. – Vol. 368. – № 1929. – P. 4677–4694.
7. Rac A. Performance investigation of chain saw lubricants based on new sunflower oil (NSO) / A. Rac, A. Vencel // *Tribologie und Schmierungstechnik*. – 2009. – Vol. 56. – № 3. – P. 51–54.
8. Mandzyuk I. A. Industrial lubricants based on renewable raw materials report 1. Study of properties acylglycerol natural fats / I. A. Mandzyuk, K. O. Prisyazhna // *Bulletin of Dnipropetrovsk University. Series Chemistry*. – 2015. – № 23. – P. 32–37.
9. Патент UA 114226 C2, МПК (2017.01), C10M 177/00, C10M 105/06 (2006.01), C10M 117/00. Спосіб синтезу біодеградуєної базової основи мастильних матеріалів / І. А. Мандзюк, К. О. Присяжна ; заявник і патентовласник Хмельницький національний університет. – № a201507870 ; заявл. 07.08.2015 ; опубл. 10.05.2017, Бюл. № 9.
10. Mandziuk I. Base oils bases synthesized using technologies of recycling waste products of thermoplastics / I. Mandziuk, K. Prisyazhna // *Proceedings of the International Conference BALTTTRIB'2015 (Kaunas, Lithuania 26–27 november 2015)*. – Kaunas, 2015.
11. Padgurskas J. Tribological properties of beef tallow as lubricating grease / J. Padgurskas, R. Rukuiža, I. Mandziuk, K. Prisyazhna // *Industrial Lubrication and Tribology*. – 2016. – Vol. 69. Issue: 5. – P. 645–654.
12. Мандзюк І. А. Новий клас основ мастильних матеріалів за вимогами “зеленої трибології” / І. А. Мандзюк, К. О. Присяжна // *Проблеми трибології*. – 2017. – № 1. – P. 35–40.
13. Ящерицын В. П. Планирование эксперимента в машиностроении / В. П. Ящерицын. – Минск : Высшая школа, 1985. – 286 с.
14. Mandzyuk I. The bases for lubricating materials synthesized by technologies of thermoplastic waste recycling / I. Mandzyuk, K. Prisyazhna // *Problems of Tribology*. – 2016. – № 1. – P. 25–30.

References

1. Lisica Z. Ukrainskiy rynek smazocnyh materialov na 90% состоit iz importerov [Elektronnyy resurs]. – Rezhim dostupu : <http://www.epravda.com.ua/press/2011/07/4/290727/>
2. Singh R. A. Biomimetics: The science of imitating nature / R. A. Singh, E. S. Yoon, R. L. Jackson // *Tribology & Lubrication Technology*. – 2009. – Vol. 65. – № 2. – P. 40–47.
3. Szargut J. Exergy Method: Technical and Ecological Applications / J. Szargut. – Southampton : WIT Press, 2004. – 222 p.
4. Afgan N. H. Energy system assessment with sustainability indicators / N. H. Afgan, M. G. Carvalho, N. V. Hovanov // *Energy Policy*. – 2000. – Vol. 28. – № 9. – P. 603–612.
5. Dekl. patent na korysnu model № 110856 Ukraina, МПК7 S10M 107/04, C10M 101/00, C11C 3/06, C10N 40/02. Sklad konsystentnoho mastyla / I. A. Mandziuk, K. O. Prisyazhna ; zaiavnyk i patentovlasnyk Khmelnytskyi natsionalnyi universytet. – № u201603572 ; zaiavl. 04.04.2016 ; opubl. 25.10.2016, Biul. № 20.
6. Nosonovsky M. Green tribology: Principles, research areas and challenges / M. Nosonovsky, B. Bhushan // *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. –

2010. – Vol. 368. – № 1929. – P. 4677–4694.

7. Rac A. Performance investigation of chain saw lubricants based on new sunflower oil (NSO) / A. Rac, A. Vencel // Tribologie und Schmierungstechnik. – 2009. – Vol. 56. – № 3. – P. 51–54.

8. Mandzyuk I. A. Industrial lubricants based on renewable raw materials report 1. Study of properties acylglycerol natural fats / I. A. Mandzyuk, K. O. Prisyazhna // Bulletin of Dnipropetrovsk University. Series Chemistry. – 2015. – № 23. – R. 32–37.

9. Patent UA 114226 S2, MPK (2017.01), S10M 177/00, S10M 105/06 (2006.01), S10M 117/00. Sposib syntezu biodehraduiuchoi bazovoi osnovy mastylnykh materialiv / I. A. Mandziuk, K. O. Prisyazhna ; zaiavnyk i patentovlasnyk Khmelnytskyi natsionalnyi universytet. – № a201507870 ; zaiavl. 07.08.2015 ; opubl. 10.05.2017, Biul. № 9.

10. Mandziuk I. Base oils bases synthesized using technologies of recycling waste products of thermoplastics / I. Mandziuk, K. Prisyazhna // Proceedings of the International Conference BALTRIB2015 (Kaunas, Lithuania 26–27 november 2015). – Kaunas, 2015.

11. Padgurskas J. Tribological properties of beef tallow as lubricating grease / J. Padgurskas, R. Rukuiža, I. Mandziuk, K. Prisyazhna // Industrial Lubrication and Tribology. – 2016. – Vol. 69. Issue: 5. – P. 645–654.

12. Mandziuk I. A. Novyi klas osnov mastylnykh materialiv za vymohamy “zelenoi trybolohii” / I. A. Mandziuk, K. O. Prisyazhna // Problemy trybolohii. – 2017. – № 1. – R. 35–40.

13. Yaschericyn V. P. Planirovanie eksperimenta v mashinostroenii / V. P. Yaschericyn. – Minsk : Vysshaya shkola, 1985. – 286 s.

14. Mandzyuk I. The bases for lubricating materials synthesized by technologies of thermoplastic waste recycling / I. Mandzyuk, K. Prisyazhna // Problems of Tribology. – 2016. – № 1. – R. 25–30.

Рецензія/Peer review : 23.5.2019 р.

Надрукована/Printed : 3.6.2019 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Диха О.В.

О.В. ІЩЕНКО, В.П. ПЛАВАН, І.О. ЛЯШОК

Київський національний університет технологій та дизайну

БІОСУМІСНІ НЕТКАНІ МАТЕРІАЛИ НА ОСНОВІ ХІТОЗАНУ

У даній роботі досліджено процеси отримання біосумісних нетканних матеріалів методом електроформування на лабораторній установці капілярного типу. Визначені основні параметри електроформування і морфологічні характеристики одержаних волокон на основі хітозану з додаванням антисептичних препаратів. Встановлено оптимальну напругу електричного поля (30 кВ) та відстань між електродами (9–11 см) для отримання волокон з хітозану з додаванням біосумісного полівінілового спирту та полівінілацетату. В результаті досліджень морфологічних особливостей отриманих волокон методом растрової електронної мікроскопії доведено, що при визначених параметрах електроформування отримуються волокна з діаметром від 0,4 до 0,9 мкм. В результаті визначення статистичного розподілу полімерних волокон у нетканому матеріалі за діаметром встановлено, що 11–20 % волокон мають діаметр 0,4–0,5 мкм, які характеризуються нанорозмірами.

Ключові слова: електроформування, біосумісні волокна, неткані матеріали, хітозан.

O.V. ISHCENKO, V.P. PLAVAN, I.O. LIASHOK

Kyiv National University of Technologies and Design

BIOCOMPATIBLE NONWOVEN MATERIALS BASED ON CHITOSAN

The object of research is biocompatible composite nanofiber nonwoven materials with antiseptic properties, obtained by the electrospinning method. One of the most problematic places is the creation of a nonwoven biocompatible composite material with antiseptic and bac-tericidal properties; it has not previously been converted into fibers by electrospinning through high energy and financial costs. The composition of biocompatible polymers is used: chitosan, polyvinyl acetate (PVAC) and polyvinyl alcohol (PVA). The electrospinning method on the capillary type laboratory installation with a «bottom-up» solution is proposed for the production of nonwoven polymeric materials. Biocompatible composite nonwovens with antiseptic properties are obtained. This is due to the fact that the proposed method of electrospinning allows to obtain nonwoven materials with a certain statistical distribution of fibers, has several features when a solution of chitosan in lactic, formic, acetic acids and antiseptic drugs is introduced into the composition. The parameters of electrospinning have been determined and morphological characteristics of the received chitosan-based fibers with addition of antiseptic drugs have been studied. The optimum voltage of the electric field of 30 kV and the distance between the electrodes 9-11 cm are found for obtaining chitosan fibers with the addition of biocompatible polyvinyl alcohol and polyvinyl acetate. As a result of investigations of morphological features for the obtained fibers by raster electron microscopy, it has been proved that fibers with a diameter of 0.4 to 0.9 μm can be obtained at the determined electrospinning parameters. The distribution of polymer fibers in a nonwoven material by diameter shows that 11-20% of fibers have a diameter of 0.4 - 0.5 μm , which are characterized by nanosizes. A part of the fibers obtained in the laboratory installation of capillary electrospinning correspond to the area of nano-dimensions, which opens up prospects for obtaining biocompatible nanofibers with antiseptic and fungicidal properties. Therefore, the production of polymer biocompatible nonwovens by electrospinning can be used to create therapeutic systems.

Key words: electrospinning, biocompatible fibers, nonwoven materials, chitosan.

Вступ

Пошук ефективних форм введення лікарських препаратів показав, що фармацевтична технологія розвивається у двох важливих напрямках – розробка лікарських форм нової генерації та удосконалення традиційних лікарських засобів [1, 2]. Нановолокнисті матеріали, отримані методом електроформування, успішно застосовують в медицині та біоінженерії для виготовлення виробів санітарно-гігієнічного, косметологічного та лікувального призначення. З огляду на умови їх використання в контакт з людським організмом, найбільше надається перевага системам з екологічно чистих композицій без застосування високотоксичних розчинників. В науковій літературі є відомості про застосування водних розчинів хітозану, колагену, полівінілацетату та полівінілового спирту для одержання нетканних матеріалів [3, 4].

Одержання біосумісних нетканних матеріалів методом електроформування є прогресивною технологією, яка дозволяє переробляти розчини і розплави різних полімерів, допускає широке варіювання технологічних параметрів виробництва, а також вигідно відрізняється гнучкістю і простотою апаратурного оформлення [5].

Хітозан – це полісахарид, який знаходить все більше застосування в різних областях промисловості і медицини. Це пов'язано з його здатністю розчинятися в кислих середовищах, ранозагоювальними і протизапальними властивостями, антимікробною і фунгіцидною дією [6]. Молекулярна маса, ступінь дезацетилювання і надмолекулярна структура хітозану визначають його біологічну активність [7]. З метою отримання низькомолекулярних препаратів, що мають високу біологічну активність, хітозан піддають контрольованій деструкції. Проте систематичні дослідження зміни кристалічної структури хітозану в цьому процесі відсутні. В той же час, представляє значний інтерес можливість використання нанокристалів хітозану для модифікації полімерів та отримання волокнистих функціональних матеріалів на їх основі [8].

Враховуючи, що жорстко-ланцюговий хітозан утворює високов'язкі розчини з яких важко одержувати нитки і волокна, використовують композиції з вмістом гнучко-ланцюгового поліетиленоксиду у кількості від 5 до 90 %. Також відомо про можливість формування нановолокон зі змішаних розчинів хітозану з іншими полімерами, як природними – колагеном, целюлозою, так і синтетичними – ПВС, полікапроамідом [9–15].

У зв'язку з цим актуальним є пошук нових технологічно прийнятних методів отримання низькомолекулярних нанокристалітів хітозану і дослідження можливості їх застосування в полімерних матеріалах, у тому числі і медичного призначення, та дослідження закономірностей отримання біосумісних нановолокон на його основі способом електроформування.

Формулювання цілей

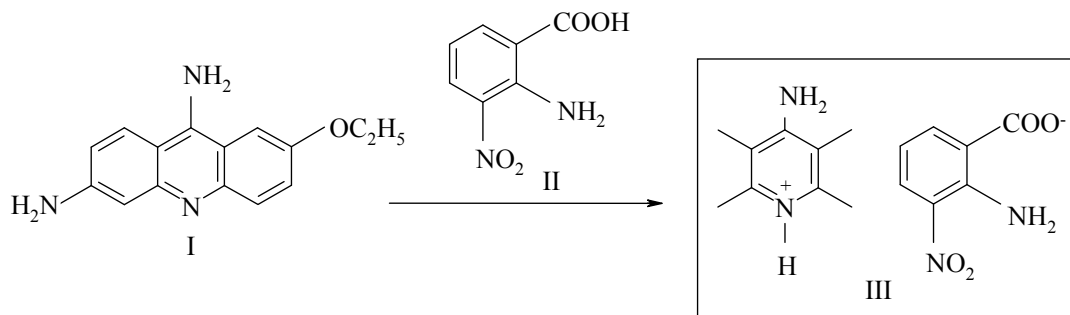
Метою роботи є встановлення можливості отримання біосумісних нетканих матеріалів методом електроформування на лабораторній установці капілярного типу; визначення основних параметрів електроформування і морфологічні характеристики одержаних волокон на основі розчинів хітозану з оцтовою, мурашиною та молочною кислотами з додаванням антисептичних препаратів.

Об'єкт та методи дослідження

В роботі досліджено використання хітозану (CAS № 9012-76-4) з додаванням 8–10 % розчину полівінілового спирту (ПВС) марки PVA-17-99 та полівінілацетату (ПВА) (CAS № 9003-20-7). Готували 7-8 % розчини хітозану в молочної (60-відсотковій CAS № 50-21-5), оцтовій (40%-вій CAS 64-19-7) та мурашиній (85-відсотковій CAS 64-18-6) кислотах та досліджували композиції у співвідношенні хітозан : ПВС (1:3), хітозан : ПВА (1:3).

Для надання функціональних (антимікробних, антисептичних, фунгіцидних) властивостей волоконотворюючим полімерам було використано препарат СГ-112 з банку перспективних сполук, синтезованих д. фарм. наук, професором С.Г. Ісаєвим (Національний фармацевтичний університет, м. Харків, 2010 р.) [16].

Препарат СГ – 6,9-діаміно-2-етоксіакридинію-3-нітроантранілат, відноситься до похідних 9-аміноакридину. Синтез солі 9-аміноакридинію (III) здійснюється шляхом зливання гарячих етанольних розчинів відповідних нітроантранілових кислот (II) із заміщеними 9-аміноакридину (I):



I – 6,9-діаміно-2-етоксіакридин; II – 3-нітроантранілова кислота; III – 6,9-діаміно-2-етоксіакридинію-3-нітроантранілат.

Препарат 6,9-діаміно-2-етоксіакридинію-3-нітроантранілат має широкий спектр фармакологічної дії, що проявляється у протигрибковій, антимікробній, протизапальній, знеболюючій та діуретичній активності та має потенційну дію у відношенні до бензпеніциліну натрієвої солі. Активний по відношенню до патогенних грибів роду *Candida* та роду *Trichophyton*, а також грамположитивних (*Staphylococcus spp.*) та грамнегативних (*Escherichia coli*, *Salmonella choleraesuis*, *S. typhimurium*, *S. dublin*, *S. typhisuis*, *Pseudomonas aeruginosa*) мікроорганізмів. Сполука може знайти застосування у медичній практиці при створенні лікарських засобів у різних лікарських формах для лікування інфекційних та запальних процесів різної етіології, а також середньої сили больових синдромів [17].

Для визначення поперечних розмірів волокон використовували метод аналізу отриманих цифрових зображень в програмному пакеті ImageJ [18] з наступною статистичною обробкою та графічним аналізом отриманих даних в пакеті Statistica [19].

Результати дослідження

Обраний для дослідження природний біосумісний полімер хітозан, розчиняли в мурашиній, молочної, оцтовій кислотах з додаванням як синтетичних пластифікуючих полімерів ПВА та ПВС. Для надання антимікробних та антисептичних властивостей в композицію вводили медичні препарати СГ-112 за рецептурним складом наведених в таблиці. У даній роботі досліджено процеси отримання біосумісних нетканих матеріалів методом електроформування на лабораторній установці капілярного типу з напругою електричного поля 30 кВ. Результати стабільності процесу електроформування наведено в таблиці 1.

Дослідження процесу електроформування композицій на основі хітозану

Отримані дані свідчать про те, що стабільне електроформування відбувається для зразків хітозану, які розчинено в оцтовій кислоті з додаванням ПВА, ПВС та медичних препаратів СГ-112. Зразки з молочною та мурашиною кислотами формуються добре з ПВА, а з ПВС електроформування не стабільне. На рисунку 1 представлено процес розщеплення розчину з капіляру на волокна (а) та нетканий матеріал (б).

Встановили, що для одержання однорідних матеріалів, в'язкість розчину композиції повинна знаходитись в межах від 0,4 до 0,9 Па*с, у вказаному діапазоні в'язкості розчину проходить формування стабільних структур зі щільними переплетіннями волокон. Оптимальна відстань між електродами складає 9-10 см. Одночасне протікання релаксаційного упорядкування надмолекулярної структури полімерів призводить до їх локальної кристалізації. Це відбувається за рахунок високих швидкостей затвердіння

тонких струменів формувального розчину й відсутності приймаючого пристрою, який забезпечує необхідний для формування упорядкованої структури, рівень орієнтаційного витягування.

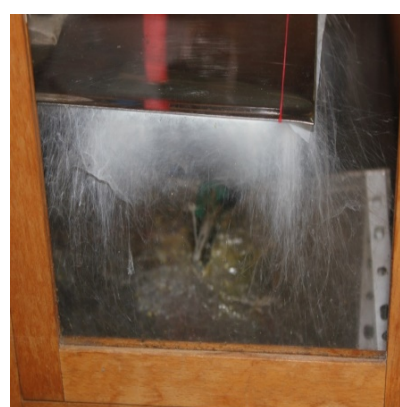
Таблиця 1

Результати стабільності процесу електроформування

Зразки	Співвідношення компонентів, у мас. ч.	Формування волокон*
Хітозан (оцт)	1:16	-
Хітозан (оцт) + ПВА	1:3	+
Хітозан (оцт) + ПВА + СГ112	1:3	+
Хітозан (оцт) + ПВС	1:3	-
Хітозан (оцт) + ПВС + СГ112	1:3	+
Хітозан (мур)	1:14	-
Хітозан (мур) + ПВА	1:3	+
Хітозан (мур) + ПВА+СГ112	1:3	+
Хітозан (мур) + ПВС	1:3	±
Хітозан (мур) + ПВС+СГ112	1:3	±
Хітозан (мол)	1:10	-
Хітозан(мол)+ПВА	1:3	-
Хітозан(мол)+ПВА +СГ112	1:5	+
Хітозан(мол)+ПВС	1:3	-
Хітозан(мол)+ПВС+СГ112	1:3	±



а)



б)

Рис. 1. Процес розщеплення розчину з капіляру на волокна методом електроформування (а), одержані неткані матеріали (б)

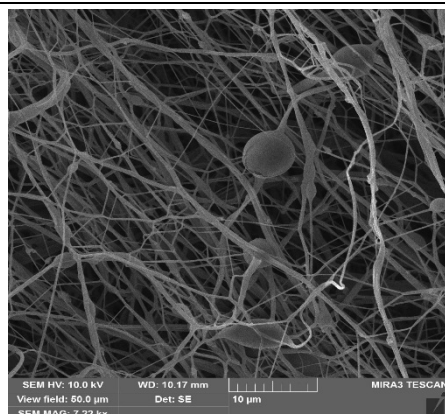
На рисунку 2 наведено мікрофотографії волокон з хітозану, розчиненого в кислотах (оцтова, мурашина, молочна) з додаванням ПВА та ПВС, отримані на електронному скануючому мікроскопі MIRA3 TESCAN у електронному вакуумі. Структура отриманих матеріалів без помітних дефектів.

В результаті визначення статистичного розподілу полімерних волокон у нетканому матеріалі за діаметром встановлено, що 69–94 % волокон мають діаметр 0,4–1,6 мкм залежно від складу розчину. Частина волокон, отриманих на лабораторному пристрої капілярного електроформування, відповідають області нанорозмірів за визначенням Елмарко [20], що відкриває перспективи отримання біосумісних нановолокон з антисептичними властивостями.

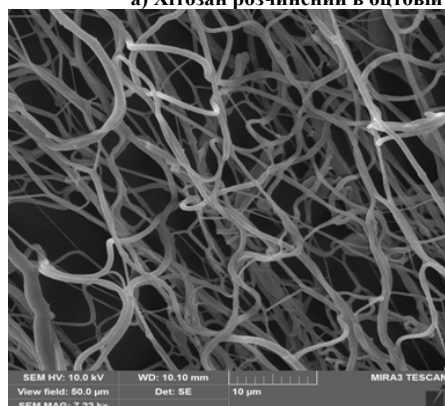
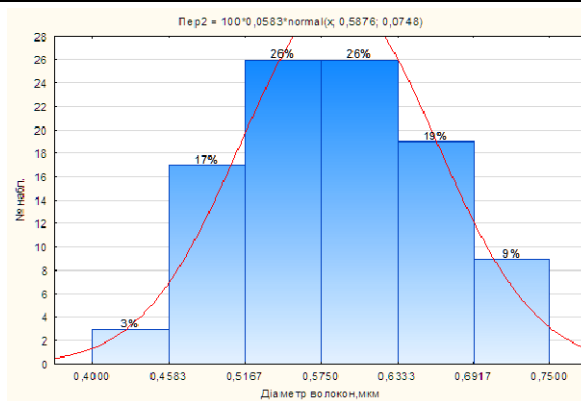
Висновки

В даній роботі доведено можливість отримання нетканих матеріалів на основі хітозану з додаванням водорозчинних синтетичних полімерів та медичних препаратів методом електроформування. Встановили, що хітозан як самостійний полімер не формується. Тому було використано ПВА та ПВС, як волоконотворюючі синтетичні пластифікуючі полімери. Встановлено, що стабільне електроформування відбувається для зразків хітозана, який розчинено в оцтовій кислоті з додаванням ПВА, ПВС та медичних препаратів СГ-112. Зразки з молочною та мурашиною кислотою формуються добре з ПВА, а з ПВС електроформування не стабільне. Оптимальна відстань між електродами складає 9-10 см.

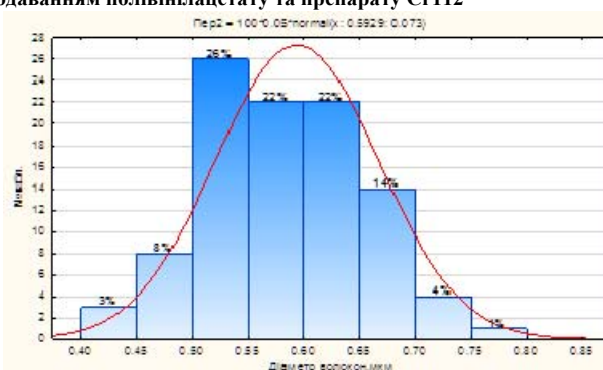
В результаті досліджень морфологічних особливостей отриманих волокон методом електронної мікроскопії доведено, що при визначених параметрах електроформування отримуються волокна з діаметром від 0,4 до 0,9 мкм. В результаті визначення статистичного розподілу полімерних волокон у нетканому матеріалі за діаметром встановлено, що 11–20 % волокон мають діаметр 0,4-0,5 мкм, які характеризуються нанорозмірами.



а) Хітозан розчинений в оцтовій кислоті з додаванням полівінілацетату та препарату Cr112



б) Хітозан розчинений в мурашиній кислоті з додаванням полівінілацетату та препарату Cr112



в) Хітозан розчинений в молочній кислоті з додаванням полівінілацетату та препарату Cr112

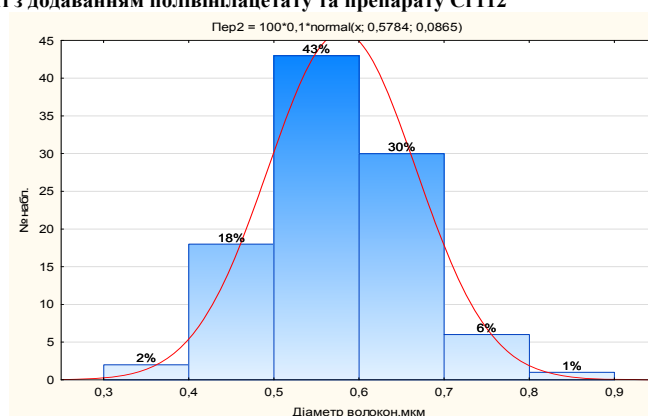


Рис. 2. Мікрофотографії нетканого волокнистого матеріалу, отримані методом електронної мікроскопії та діаграми статистичного розподілу діаметрів волокон

Література

1. Давтян Л.Л. Полимерные материалы и медицинские пленки / Л.Л. Давтян // Ліки України. – 2000. – № 7-8. – С. 52–55.
2. Давтян Л.Л. Технологічна лінія виробництва лікарських плівок / Л.Л. Давтян, А.Л. Давтян // Фарм. Ж. – 2003. – № 3. – С. 88–92.
3. Liao S. Electrospun nanofibers: Work for medicine? / S. Liao, C.K. Chan, S. Ramakrishna // Front. Mater. Sci. China. – 2010. – Vol. 4, № 1. – P. 29–33.
4. Прокопчук Н. Р. Электроформование нановолокон из раствора хитозана (обзор) / Н. Р. Прокопчук, Ж. С. Шашок, Д. В. Прищепенко, В. Д. Меламед // Полимерные материалы и технологии – 2015. – Т. 1, № 2. – С. 36–56.
5. Aragwal S. Use of electrospinning technique for biomedical applications / S. Aragwal, J.H. Wendorff, A. Greiner // Polymer. – 2008. – Vol. 49. – P. 5603–5621.
6. Chitosan chemistry and pharmaceutical perspectives / M. N. Kumar, R. A. Muzzarelli, C. Muzzarelli [et al.] // Chem. Rev. – 2004. – Vol. 104, N 12. – P. 6017–6084.
7. Гальбрайт Л.С. Хитин и хитозан: строение, свойства, применение / Л.С. Гальбрайт // Соревский образовательный журнал. – 2001. – Т. 7, № 1. – С. 51–56.
8. Прокопчук Н. Р. Электроформование нановолокон из раствора хитозана (обзор) / Н. Р. Прокопчук, Ж. С. Шашок, Д. В. Прищепенко, В. Д. Меламед // Полимерные материалы и технологии. –

2015. – Т. 1. № 2. – С. 36–56.

9. Koliada M. Characterisation of electrospun fibers made of PVA or PVAc and collagen derivative / M. Koliada, O. Ishchenko, V. Plavan and V. Bessarabov // *Vlakna a textile*. – 2018. – Vol. 25 (2). – P. 48–52.
10. Ishchenko O. Producing of nonwoven materials by electrospinning of biocompatible polymers with chitosan addition / O. Ishchenko, V. Plavan, I. Resnytskyi, I. Liashok // *Технологический аудит и резервы производства*. – 2018. – № 5/3(43). – С. 4–7.
11. Yu J.H. The Role of Elasticity in the Formation of Electrospun Fibers / J.H. Yu, S.V. Fridrikh, G.C. Rutledge // *Polymer*. – 2006. – V. 47 (13). – P. 4789–4797.
12. Ohkawa K. Chitosan Nanofiber / K. Ohkawa, K.-I. to Mina // *Biomacromolecules*. – 2006. – V. 7. – P. 3291–3294.
13. Duan B. Electrospinning of chitosan solutions in acetic acid with poly(ethylene oxide) / B. Duan, C. Don // *J. Biomater Sci. Polymer Ed.* – 2004. – V. 15 (6). – P. 797–811.
14. Lou C-W. Preparation of polyethylene oxide/chitosan fiber membranes by electrospinning and the evaluation of biocompatibility / C-W. Lou, J-H. Lin // *Text. Res. J.* – 2008. – V. 78 (3). – P. 254–257.
15. Zhang Y. Preparation of electrospun chitosan/poly (vinyl alcohol) membranes / Zhang Y., Huang X. e.a. / *Colloid. Polymer Sci.* – 2007. – V. 285 (8). – P. 855–863.
16. Ісаєв С.Г. Синтез та антимікробна активність похідних 5-нітро-9- N - R -акридину / С. Г. Ісаєв, О. О. Павлій, О. О. Огіренко, А. О. Ткач, Н. О. Волкова // *Вісник фармації*. – 2000. – № 2. – С. 7–10.
17. Іщенко О.В. Використання похідних акридину для створення нових біологічно активних матеріалів / О.П. Сумська, Н.В. Панченко, О.В. Іщенко // *Синтез і аналіз біологічно активних речовин і лікарських субстанцій : тези доповідей Всеукр. наук.-практ. конф. з міжнар. участю, присвяченої 80-річчю з дня народження доктора фармацевтичних наук, професора О. М. Гайдукевича (12-13 квітня 2018 р.)*. – Х. : НФаУ, 2018. – С. 188–189.
18. Perez J., Pascau J. Image processing with ImageJ, Packt Publishing Ltd. – 2013. – 140 p.
19. Hill, T., Lewicki, P. Statistics: methods and applications: a comprehensive reference for science, industry, and data mining, StatSoft Inc., 2006. 832 p.
20. Технология Nanospider™ [Электронный ресурс] // Элмарко. – Режим доступа : <http://www.elmarco.com/electrospinning/key-features-of-nanofibers/>

References

1. Davtyan L.L. Polimernye materialy i medicinskie plenki / L.L. Davtyan // *Liki Ukraïni*. – 2000. – № 7-8. – С. 52–55.
2. Davtian L.L. Tekhnolohichna liniia vyrobnytstva likarskykh plivok / L.L. Davtian, A.L. Davtian // *Farm. Zh.* – 2003. – № 3. – С. 88–92.
3. Liao S. Electrospun nanofibers: Work for medicine? / S. Liao, C.K. Chan, S. Ramakrishna // *Front. Mater. Sci. China*. – 2010. – Vol. 4, № 1. – P. 29–33.
4. Prokopchuk N. R. Elektroformovanie nanovolokon iz rastvora hitozana (obzor) / N. R. Prokopchuk, Zh. S. Shashok, D. V. Prischepenko, V. D. Melamed // *Polimernye materialy i tehnologii*. – 2015. – Т. 1, № 2. – С. 36–56.
5. Aragwal S. Use of electrospinning technique for biomedical applications / S. Aragwal, J.H. Wendorff, A. Greiner // *Polymer*. – 2008. – Vol. 49. – P. 5603–5621.
6. Chitosan chemistry and pharmaceutical perspectives / M. N. Kumar, R. A. Muzzarelli, C. Muzzarelli [et al.] // *Chem. Rev.* – 2004. – Vol. 104, N 12. – P. 6017–6084.
7. Gal'brayh L.S. Hitin i hitozan: stroenie, svoystva, primenenie / L.S. Gal'brayh // *Sorovskiy obrazovatel'nyy zhurnal*. – 2001. – Т. 7, № 1. – С. 51–56.
8. Prokopchuk N. R. Elektroformovanie nanovolokon iz rastvora hitozana (obzor) / N. R. Prokopchuk, Zh. S. Shashok, D. V. Prischepenko, V. D. Melamed // *Polimernye materialy i tehnologii*. – 2015. – Т. 1, № 2. – С. 36–56.
9. Koliada M. Characterisation of electrospun fibers made of PVA or PVAc and collagen derivative / M. Koliada, O. Ishchenko, V. Plavan and V. Bessarabov // *Vlakna a textile*. – 2018. – Vol. 25 (2). – P. 48–52.
10. Ishchenko O. Producing of nonwoven materials by electrospinning of biocompatible polymers with chitosan addition / O. Ishchenko, V. Plavan, I. Resnytskyi, I. Liashok // *Технологический аудит и резервы производства*. – 2018. – № 5/3(43). – С. 4–7.
11. Yu J.H. The Role of Elasticity in the Formation of Electrospun Fibers / J.H. Yu, S.V. Fridrikh, G.C. Rutledge // *Polymer*. – 2006. – V. 47 (13). – P. 4789–4797.
12. Ohkawa K. Chitosan Nanofiber / K. Ohkawa, K.-I. to Mina // *Biomacromolecules*. – 2006. – V. 7. – P. 3291–3294.
13. Duan B. Electrospinning of chitosan solutions in acetic acid with poly(ethylene oxide) / B. Duan, C. Don // *J. Biomater Sci. Polymer Ed.* – 2004. – V. 15 (6). – P. 797–811.
14. Lou C-W. Preparation of polyethylene oxide/chitosan fiber membranes by electrospinning and the evaluation of biocompatibility / C-W. Lou, J-H. Lin // *Text. Res. J.* – 2008. – V. 78 (3). – P. 254–257.
15. Zhang Y. Preparation of electrospun chitosan/poly (vinyl alcohol) membranes / Zhang Y., Huang X. e.a. / *Colloid. Polymer Sci.* – 2007. – V. 285 (8). – P. 855–863.
16. Isaiev S.H. Syntez ta antymikrobna aktyvnist pokhidnykh 5-nitro-9- N - R -akrydynu / S. H. Isaiev, O. O. Pavlii, O. O. Ohirenko, A. O. Tkach, N. O. Volkova // *Visnyk farmatsii*. – 2000. – № 2. – С. 7–10.
17. Іщенко О.В. Використання похідних акридину для створення нових біологічно активних матеріалів / О.П. Сумська, Н.В. Панченко, О.В. Іщенко // *Синтез і аналіз біологічно активних речовин і лікарських субстанцій : тези доповідей Всеукр. наук.-практ. конф. з міжнар. участю, присвяченої 80-річчю з дня народження доктора фармацевтичних наук, професора О. М. Гайдукевича (12-13 квітня 2018 р.)*. – Х. : НФаУ, 2018. – С. 188–189.
18. Perez J., Pascau J. Image processing with ImageJ, Packt Publishing Ltd. 2013. 140 p.
19. Hill, T., Lewicki, P. Statistics: methods and applications: a comprehensive reference for science, industry, and data mining, StatSoft Inc., 2006. 832 p.
20. Tehnologiya Nanospider™ [Elektronnyy resurs] // Elmarko. – Rezhim dostupa : <http://www.elmarco.com/electrospinning/key-features-of-nanofibers/>

Рецензія/Peer review : 9.5.2019 р. Надрукована/Printed : 3.6.2019 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Галавська Л.С.

DOI 10.31891/2307-5732-2019-273-3-77-81

УДК 378.147: 543.635:664:665.3

Н.Ю. ГРИБОВА, А.І. МАЛИШЕВСЬКА, О.Ю. КУРСЕНКО, О.І. ХИЖАН, Л.О. КОВШУН

Національний університет біоресурсів та природокористування України
Національний медичний університет імені О.О. Богомольця

ІНТЕРАКТИВНІ МЕТОДИ НАВЧАННЯ ТА РЕВАЛІДАЦІЙНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДИК ВИКОНАННЯ ВИМІРЮВАНЬ КСЕНОБІОТИКІВ

В роботі наведено опис застосування інтерактивних методів навчання для проведення підготовки нових співробітників лабораторії до виконання досліджень показників безпеки харчової продукції згідно з затвердженими методиками виконання вимірювань. В період навчання нові співробітники є стажерами, співпрацюють з провідними фахівцями лабораторії, на практиці вивчають особливості підготовки проб до дослідження та хроматографічні методи лабораторного контролю. Процес навчання стажерів запропоновано завершувати ревалідаційними дослідженнями, опрацьованими в період навчання методикам виконання вимірювань ксенобіотиків.

Ключові слова: інтерактивні методи навчання, показники безпеки харчової продукції, лабораторний контроль, методики виконання вимірювань, ревалідаційні дослідження, хроматографічні методи дослідження.

N.Y. HRYBOVA, H.I. MALYSHEVSKA, O.Y. KURSENKO, O.I. KHYZHAN, L.O. KOVSHUN

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv
Bogomolets National Medical University, Kyiv

INTERACTIVE TEACHING METHODS AND XENOBIOTICS TEST METHODS REVALIDATION

Food products investigation according to standardized or developed and validated by laboratory test methods by specialists of different foods laboratories, veterinary medicine laboratories and higher educational establishments, research laboratories are necessary for food products quality and safety. This article shares interactive teaching methods, which was applied for interns by specialists. The intern studied food safety test methods during the process approbation and revalidation. Various variations of two methods of interactive teaching technology were used: "method of discussion" and "method of practical work". The training was conducted using test samples (quality control samples): oilseeds and sunflower seeds. As a result of training, interns studied the methodology test methods. Interns performed various exercises which were offered to accordance with the interactive technology of training. A specialist was ensured active interaction of trainees with a skilled specialist using interactive teaching methods. Training is divided into thematic stages. At the first topic, an interns learned theoretical information, compiled the flowchart of the research and collaborated in the preparation of the sample for research, followed by observing the actions of a specialist and discussing the peculiarities of certain stages of the study. At the second topic, they received a test sample and performed all stages of the study on their own. The results of the research were analysed and compared with the expected value. The test samples using and the approbation studies conduct allowed obtaining confirmation of a methodology assimilation sufficient level. The revalidation studies execution lets to confirm a sufficient an intern's skills level which was acquired by them for measuring xenobiotic content according to the acquired test methods.

Keywords: interactive teaching methods, food safety indicators, laboratory control, test methods, revalidation, chromatographic methods of analysis

Вступ

Належне виконання фахівцями лабораторій харчових підприємств, державних лабораторій ветеринарної медицини, науково-дослідницьких лабораторій вищих навчальних закладів, випробувань харчової продукції у відповідності до стандартизованих або розроблених та валідованих в лабораторії методик виконання вимірювань (МВВ) є необхідними для здійснення контролю показників якості та безпеки продуктів харчування [1, 2]. Як правило, кількість фахівців, що застосовують МВВ для виробничих потреб змінюється через різні причини, тому на підприємстві потрібно проводити навчання нових співробітників, які на період освоєння методики стають стажерами і плідно співпрацюють з провідними фахівцями. Практика навчання в середині лабораторії та підготовка фахівців на тренінгах або курсах підвищення кваліфікації дозволяють в стислі терміни провести підготовку та перепідготовку кадрів. Як правило, тренінги організують розробники методів, або лабораторії, що успішно запровадили відповідні методики дослідження [3, 4]. Робота фахівців-викладачів на заняттях спрямована на розвиток інформаційної, методологічної, аналітичної, самоосвітньої компетентностей співробітників-стажерів. При цьому організація навчання може відбуватися за різними технологіями навчання серед яких найбільш поширені – лекції та практичні роботи. Враховуючи освітньо-кваліфікаційний рівень стажерів та їх професійний досвід, установа-організатор узгоджує і пропонує найбільш прийнятну програму навчання. Підготовані на курсах співробітники набувають нових знань і мають змогу поширити сучасні знання та нові навички на підприємствах серед інших зацікавлених колег. Одними з доступних та ефективних методів передачі знань від фахівців до слухачів є інтерактивні методи навчання, котрі рекомендовані для навчання та розвитку саме мотивованих осіб, активних учасників процесу навчання [5, 6]. Інтерактивна технологія навчання пропонує багато методів, серед яких для навчання стажерів найбільш поширено застосовують: практичні завдання на відпрацювання навичок, роботу у групі, дискусію. Якщо говорити про навчання нових співробітників в середині лабораторії, то інтерактивні методи навчання також можна застосовувати за умови попередньої теоретичної підготовки слухачів, в рамках якої стажери вивчають особливості об'єктів дослідження, світовий досвід роботи з об'єктами, тощо. Тематика та перелік необхідних документів для теоретичної підготовки визначається перед навчанням і дозволяє зрозуміти особливості методології

лабораторного контролю та об'єктів дослідження. Наприклад, навчання в рамках підготовки фахівців для контролю вмісту ксенобіотиків в харчових продуктах має включати ознайомлення з документацією, що встановлює дозволений максимальний рівень вмісту забруднювачів у продуктах харчування рослинного та тваринного походження, оскільки нормативна документація відображає результати токсикологічних досліджень, а також можливість відомих чи задіяних аналітичних методів та методик виконання вимірювань. Деякі зазначені в документі [7, 8] максимальні залишки ксенобіотиків відповідають нижчому рівню їх аналітичного визначення, величини залишкових кількостей контамінантів можуть оновлюватися, оновлені Переліки враховують нову інформацію щодо поліпшення технічної частини методології лабораторного контролю та дозволяють проводити вимірювання вмісту ксенобіотиків на більш низьких рівнях [9]. Інші норми враховують обґрунтовані санітарно-гігієнічними експертизами результати і їх зміна відбувається за результатами нових даних токсикологічних експертиз, з урахуванням кумулятивного та синергічного негативного впливу на здоров'я людини. Слід зазначити, що Європейські нормативні документи, що регулюють вміст ксенобіотиків в продукті харчування не містять посилань на методику, що була застосована для вимірювання показників, а, наприклад, національний ДСанПіН 8.8.1.2.3.4-000-2001 «Допустимі дози, концентрації, кількості та рівні вмісту пестицидів у сільськогосподарській сировині, харчових продуктах, повітрі робочої зони, атмосферному повітрі, воді водоймищ, ґрунті» містить посилання на методи та відповідні методики, розлого викладені в методичних рекомендаціях до МВВ, розроблених до 2001 року і сьогодні є технічно застарілими. Стан методичного забезпечення процесу вимірювання більшості показників безпечності, згідно національних стандартів, говорить про необхідність розробки нових та оновлення існуючих методів дослідження. В Україні робота по розробці сучасних методик дослідження показників безпечності активувалася за останні роки, при цьому відбувається дослідження не лише показників безпечності а вивчаються властивості продуктів харчування, ведеться пошук інгредієнтів для створення функціональних продуктів харчування [10–12]. В Україні та країнах ЄС питання щодо застосування в одній лабораторії різними співробітниками розроблених та у відповідності до процедури валідованих методик дослідження вирішується шляхом проведення ревалідаційних досліджень, що розширюють перелік факторів, здатних вплинути на результат вимірювання. Такий підхід дозволяє сучасним лабораторіям постійно модернізувати методики дослідження, передавати досвід в середині лабораторії та визначати поточну похибку з якою лабораторія отримує результат вимірювання показників безпечності [13, 14].

Метою даної роботи став пошук ефективних інтерактивних методів навчання для здійснення в середині дослідницької лабораторії підготовки нових співробітників до самостійного виконання вимірювань вмісту ксенобіотиків в продукції рослинництва за допомогою сучасних методик виконання вимірювань.

В роботі застосовувались різні варіації двох методів інтерактивної технології навчання: «метод обговорення» і «метод практичної роботи», вивчення методики дослідження та нормативної документації, що регулює вміст ксенобіотиків в продукті харчування, доручалися стажеру на передодні занять з фахівцем. Навчання проводили провідні фахівці лабораторії, котрі мали досвід виконання випробувань не менше двох років і були виконавцями валідаційних досліджень певного переліку методик дослідження. Фахівцями були підготовані методичні розробки занять та складено індивідуальні навчально-методичні карти. Навчання проводилося із застосуванням тестових зразків (внутрішньолабораторних зразків контролю якості): насіння олійних культур та рослини соняшнику. Гомогенізація проби зразків продукції проводилось при кімнатній температурі із застосуванням лабораторної зернового млинку ЛЗМ-1. Розділення фаз екстракційної системи проведено із використанням автоматичної установки для фільтрування під вакуумним пресом фірми «VARIAN». Випаровування екстрагенту з екстракту проведено в ротатійному випаровувачі фірми «ІКА» в умовах роботи за звичайних умов. Вимірювання вмісту ксенобіотиків в отриманих витяжках проведено методом високоефективної рідинної хроматографії із флуоресцентним детектором (ВЕРХ/ФЛД) із застосуванням хроматографу Ultimate 3000 фірми «Dionex», та хроматографу Ultimate 3000 dual pump фірми Dionex. Результати аналітичних сигналів опрацьовані в програмі Cromleon 6,0. Статистичний обробіток результатів аналізу: розрахунок середнього значення та похибки, контроль за змінами розкиду результатів, розрахунок повної невизначеності результату аналізу проведено за допомогою програми Excel. Апробацію та ревалідаційні дослідження методики стажери виконували на атестованих тестових зразках (внутрішньолабораторних зразках контролю якості випробування).

На заняттях організованих із застосуванням інтерактивного методу «обговорення завдань, дій та результатів випробування» були виконані завдання на самостійне вивчення методики дослідження в цілому та її блок-схеми, завдання на пояснення фізико-хімічних особливостей процесів підготовки проби до дослідження та вилучення ксенобіотиків виконані у співпраці провідним фахівцем, вправи «мозковий штурм» дозволили провести ілюстрацію та обговорення умов роботи хроматографічної системи при різних умовах налаштування хроматографічної системи, ідентифікувати та провести кількісний аналіз аналітичних сигналів досліджуваних ксенобіотиків. В результаті закріплення нових знань та навичок навчання стажерами самостійно отримано результати інструментального контролю, проведено розрахунки кількості аналізу в робочих розчинах, встановлено допустимі границі розкиду результатів вимірювання та пояснено необхідність подальших досліджень і розрахунків величини повної невизначеності випробування.

В таблиці 1 наведено результати вмісту аналізу, отримані на занятті провідним фахівцем та його стажерами під час випробування тестових зразків з трьома рівнями очікуваних значень. З таблиці 1 можна

бачити, що середні значення результатів кількісного аналізу вимірювання вмісту ксенобіотику в різних тестових зразках, отримані провідним фахівцем та першим стажером в п'яти паралельних дослідженнях співпадають в межах похибки між виконавцями та знаходяться в межах прийнятної діапазону розкиду значень. Результати першого стажера говорять про задовільне виконання вимірювань що, відповідно пов'язане з задовільним засвоєнням ним методики виконання вимірювань. Як можна бачити з таблиці 1 результати середнього значення, отримані досвідченим фахівцем і другим стажером не співпадають. Результат дослідження зразку з очікуваним вмістом аналіту $11,07 \pm 1,42$ мкг/кг становить $10,40 \pm 0,12$ мкг/кг, і, хоча величина потрапляє в діапазон очікуваної кількості, звертає на себе увагу систематичне заниження значень вмісту ксенобіотику, в порівнянні з даними, що отримані провідним фахівцем та першим стажером. Аналізуючи результати вимірювань, отримані другим стажером, можна припустити, що під час випробування другий стажер допускав систематичну похибку, що призвела до заниження, в порівнянні з іншими виконавцями та очікуваною кількістю, вмісту аналіту. Результати дослідження зразків з очікуваними значеннями вмісту ксенобіотиків: $4,42 \pm 0,61$ мкг/кг та $1,14 \pm 0,17$ мкг/кг, отримані другим стажером навпаки, характеризуються збільшенням, в порівнянні з результатами інших двох виконавців, очікуваним значенням встановленої середньої кількості, а саме: $4,84 \pm 0,05$ та $1,32 \pm 0,04$ мкг/кг. Оскільки три виконавця використовували один прилад і одну калібровку для встановлення кількості аналіту за аналітичним сигналом, виявленим на хроматограмі, враховуючи те, що виконавці проводили самостійно процес підготовки проби до дослідження та процес хроматографічного контролю, імовірно, другим стажером були допущені помилки на етапі підготовки проби до дослідження або переносі підготовленої проби в віалу для хроматографування.

Таблиця 1

Результати аналітичних сигналів (площа піку) тестових зразків отримані в програмі Cromleon 6,0 та результати вмісту аналіту в тестовому зразку, розраховані в програмі Excel

№ з/п	Вміст (очікуване значення) аналіту в тестовому зразку, мкг/кг					
	$11,07 \pm 1,42$		$4,42 \pm 0,61$		$1,14 \pm 0,17$	
	площа піку, ум. од.	встановлений вміст	площа піку, ум. од.	встановлений вміст	площа піку, ум. од.	встановлений вміст
Результати отримані провідним фахівцем						
1	22522556	10,97	9007291	4,39	2353616	1,14
2	22779656	11,09	9088312	4,42	2271032	1,10
3	22803278	11,10	9005151	4,38	2312324	1,12
4	22486950	10,95	8931661	4,36	2250387	1,09
5	22596951	11,00	8857963	4,33	2100236	1,03
Середнє значення		$11,02 \pm 0,04$		$4,38 \pm 0,02$		$1,10 \pm 0,02$
Результати отримані першим стажером						
1	22318059	10,87	8931661	4,36	2250387	1,09
2	22441250	10,93	9333323	4,52	2477490	1,20
3	22382964	10,90	9168085	4,45	2563941	1,24
4	22523377	10,97	9231486	4,48	2353616	1,14
5	22356465	10,89	9173433	4,46	2394907	1,16
Середнє значення		$10,91 \pm 0,02$		$4,45 \pm 0,03$		$1,17 \pm 0,03$
Результати отримані другим стажером						
1	22069054	10,75	9605366	4,67	2250387	1,29
2	21186292	10,32	9975594	4,85	2477490	1,42
3	20960469	10,21	10057867	4,89	2563941	1,24
4	21371056	10,41	10078435	4,9	2353616	1,27
5	21186292	10,32	10016731	4,87	2394907	1,36
Середнє значення		$10,40 \pm 0,12$		$4,84 \pm 0,05$		$1,32 \pm 0,04$

Другому стажеру було рекомендовано виконати повторну підготовку проби та, за необхідністю, пройти повторне внутрішнє навчання етапу підготовки проби до дослідження згідно з опрацьованою методикою виконання вимірювань. Після повторної підготовки проби другий стажер отримав задовільні результати вмісту ксенобіотику, а саме: $10,95 \pm 0,06$ мкг/кг; $4,37 \pm 0,04$ мкг/кг; $1,05 \pm 0,05$ мкг/кг. Подальші дослідження включали випробування, що були спрямовані на проведення ревалідаційних досліджень МВВ, перевіряли встановлену у валідаційних дослідженнях калібрувальну залежність (таблиця 2), межу кількісного вимірювання (МКВ), межу виявлення аналіту (МВА), величину повної невизначеності результату випробування.

Результати калібрувальної залежності, отримані в ревалідаційних дослідженнях МВВ ксенобіотиків групи поліциклічних ароматичних вуглеводнів

Сполука	Калібрувальні характеристики		
	Регресія	МВА, мкг/кг	МКВ, мкг/кг
Бенз(а)пірен	Лінійна ($R^2 = 99,997\%$)	0,1	0,5
Хризен	Лінійна ($R^2 = 99,988\%$)	0,1	0,5
Бенз(а)антрацен	Лінійна ($R^2 = 99,992\%$)	0,1	0,5
Бенз(б)флуорантен	Лінійна ($R^2 = 99,994\%$)	0,1	0,5

З аналізу отриманих величин (таблиця 2), бачимо, що для виконання ревалідаційних досліджень застосовували розчини аналітичних стандартів бенз(а)пірену, бенз(а)антрацену, хризену і бензо(б)флуорантену. Згідно отриманої калібрувальної залежності найнижча концентрація ксенобіотиків, що може бути виміряна в зразку дорівнює 0,5 мкг/кг. Найнижчий вміст ксенобіотику, при умові його присутності в зразку, може бути встановлено на рівні 0,1 мкг/кг. Отримані величини МВА та МКВ співпадають з величинами МВА та МКВ, що були отримані в попередніх валідаційних дослідженнях. Тому, для підтвердження коректності виконання стажерами випробувань, згідно з засвоєною МВВ, був проведений розрахунок величини повної невизначеності результату вимірювання. Повна невизначеність розрахована як сума величин невизначеності, що описує етап підготовки проби та невизначеності, що відображає застосований методу інструментального вимірювання [15]. Отримані результати говорять про задовільне засвоєння стажерами МВВ та підтверджують їх можливість самостійно проводити випробування продукції згідно з МВВ.

Висновки

Таким чином, під час навчання і закріплення знань стажерами виконувалися різні завдання, розроблені згідно з інтерактивною технологією навчання. Забезпечено активну взаємодію стажерів із досвідченим фахівцем за допомогою інтерактивних методів навчання. Навчання розділено на тематичні етапи: на першому етапі стажери засвоїли теоретичні відомості, склали блок-схеми дослідження та співпрацювали під час підготовки проби до дослідження, відбувалося спостереження за діями фахівця та обговорення особливостей певних стадій дослідження; на другому етапі стажери отримували тестовий зразок і виконували всі стадії дослідження самостійно, результати досліджень аналізувались та порівнювались з очікуваним значенням. Використання тестових зразків (внутрішньолaboratorних зразків контролю якості випробування) та проведення апробаційних досліджень дозволили отримати підтвердження достатнього рівня засвоєння методики. Виконання ревалідаційних досліджень, розрахунок та порівняння величини повної невизначеності результату дослідження вмісту ксенобіотиків з відповідною величиною, що була отримана під час валідаційних досліджень, підтвердили достатній рівень набутих стажером навичок для вимірювання вмісту ксенобіотиків згідно засвоєної МВВ.

Література

1. Вимоги до будь-яких організацій харчового ланцюга (ISO 22000:2005, IDT) : ДСТУ ISO 22000:2007. – [Чинний від 2007-08-01]. – К. : Держспоживстандарт України, 2007. – 31 с. – (Національний стандарт України).
2. Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій (ISO 17025:2017, IDT) : ДСТУ ISO 17025:2017. – [Чинний від 2018-01-01]. – К. : Держспоживстандарт України, 2017. – 40 с. – (Національний стандарт України).
3. Нестерова Л.О. Розробка методики контролю ізомерів поліциклічних ароматичних вуглеводнів в рослинних оліях / Л.О. Нестерова, Н.Ю. Грибова, О.І. Хижан // Вісник НУБіП України. – 2018. – № 286. – С. 311–319.
4. Грибова Н.Ю. Екстракція ксенобіотиків групи ПАВ з насіння соняшнику / Н.Ю. Грибова // Вісник НУБіП України. – 2018. – № 294. – С. 209–218.
5. Сисоева С. О. Інтерактивне навчання дорослих у системі післядипломної педагогічної освіти / С. О. Сисоева // Наукові праці [Чорноморського державного університету імені Петра Могили комплексу "Києво-Могилянська академія"]. Сер.: Педагогіка. – 2011. – Т. 158, Вип. 146. – С. 5–10.
6. Енциклопедія освіти / Акад. пед. наук України ; головний ред. В.Г. Кремень. – К. : Юрінком Інтер, 2008. – 1040 с.
7. Допустимі дози, концентрації, кількості та рівні вмісту пестицидів у сільськогосподарській сировині, харчових продуктах, повітрі робочої зони, атмосферному повітрі, воді водоймищ, ґрунті : ДСанПІН 8.8.1.2.3.4-000-2001. – [Чинний від 2001-01-01]. – К. : Держспоживстандарт України, 2001. – 360 с. – (Державні санітарно-гігієнічні правила і норми).
8. Державні санітарно-гігієнічні правила і норми: Регламент максимальних рівнів окремих забруднюючих речовин у харчових продуктах, затверджені наказом МОЗ України від 13.05.2013 № 368. – [чинні від 2016-06-14]. – К. : Держспоживстандарт України, 2014. – 25 с. – (Державні санітарно-гігієнічні правила і норми).

9. Грибова Н.Ю. Лабораторний контроль антибіотиків в продукції бджільництва / Н.Ю. Грибова, Е.В. Бішчук, В.О. Ушкалов, Т.С. Пазушан // Науковий вісник ветеринарної медицини. – 2016. – № 1. – С. 14–18.
10. Грибова Н.Ю. Влияние условий экстракции на антиоксидантные свойства извлеченных фенолов / Н.Ю. Грибова // Методы и объекты химического анализа. – 2012. – Т. 7. № 4. – С. 202–206.
11. Филиппенко Т.А. Антиоксидантное действие экстрактов лекарственных растений и фракций их фенольных соединений / Т.А. Филиппенко, Н.Ю. Грибова // Химия растительного сырья. – 2012. – № 1. – С. 77–81.
12. Филиппенко Т.А. Антиоксидантная активность аминокислот при окислении подсолнечного масла в эмульсии / Т.А. Филиппенко, Н.Ю. Грибова // Химико-фармацевтический журнал. – 2012. – Том 45, № 5. – С. 40–42.
13. Hibbert D.B. Method validation, in Encyclopedia of Analytical Science. Quality Assurance: Elsevier Ltd, 2nd Edition, 2004. 350 p.
14. Concerning the Performance of Analytical Methods and the Interpretation of Result (Commission Decision 2002/657/EC [12 August Implementing Council Directive 96/23/EC]. European Commission. – Brussels, 2002.
15. Guidance document on analytical quality control and method validation procedures for pesticides residues analysis in food and feed (SANTE/11813/2017). 2017.

References

1. 1. Vymohy do bud-yakych orhanizatsii kharchovoho lantsiua (ISO 22000:2005, IDT) : DSTU ISO 22000:2007. – [Chynnyi vid 2007-08-01]. – К. : Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 2007. – 31 s. – (Natsionalnyi standart Ukrainy).
2. Zahalni vymohy do kompetentnosti vyprobuvalnykh ta kalibruvalnykh laboratorii (ISO 17025:2017, IDT) : DSTU ISO 17025:2017. – [Chynnyi vid 2018-01-01]. – К. : Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 2017. – 40 s. – (Natsionalnyi standart Ukrainy).
3. Nesterova L.O. Rozrobka metody kontroliu izomeriv politsyklivnykh aromatychnykh vuhlevodniv v roslynnykh oliiakh / L.O. Nesterova, N.Iu. Hrybova, O.I. Khyzhan // Visnyk NUBiP Ukrainy. – 2018. – № 286. – С. 311–319.
4. Hrybova N.Iu. Ekstraktsiia ksenobiotykv hrupy PAV z nasinnia soniashnyku / N.Iu. Hrybova // Visnyk NUBiP Ukrainy. – 2018. – № 294. – С. 209–218.
5. Sysoieva S. O. Interaktyvne navchannia doroslykh u systemi pislidyplomnoi pedahohichnoi osvity / S. O. Sysoieva // Naukovi pratsi [Chornomorskoho derzhavnoho universytetu imeni Petra Mohyly kompleksu "Kyievo-Mohylianska akademiia"]. Ser.: Pedahohika. – 2011. – Т. 158, Vyp. 146. – С. 5–10.
6. Entsyklopediia osvity / Akad. ped. nauk Ukrainy ; holovnyi red. V.H. Kremen. – К. : Yurinkom Inter, 2008. – 1040 s.
7. Dopustymi dozy, konsentratsii, kilkosti ta rivni vmistu pestytsydiv u silskohospodarskii syrovyni, kharchovykh produktakh, povitri robochoi zony, atmosferomu povitri, vodi vodoimyshch, grunti : DSanPiN 8.8.1.2.3.4-000-2001. – [Chynnyi vid 2001-01-01]. – К. : Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 2001. – 360 s. – (Derzhavni sanitarno-hihiienichni pravyla i normy).
8. Derzhavni sanitarno-hihiienichni pravyla i normy: Rehlament maksimalnykh rivniv okremykh zabrudniuuyuchykh rehovyn u kharchovykh produktakh, zatverdzeni nakazom MOZ Ukrainy vid 13.05.2013 № 368. – [chynni vid 2016-06-14]. – К. : Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 2014. – 25 s. – (Derzhavni sanitarno-hihiienichni pravyla i normy).
9. Hrybova N.Iu. Laboratornyi kontrol antybiotykv v produktsii bdzhilnytstva / N.Iu. Hrybova, E.V. Bishchuk, V.O. Ushkalov, T.S. Pazushchan // Naukovyi visnyk veterynarnoi medytsyny. – 2016. – № 1. – С. 14–18.
10. Gribova N.Yu. Vliyanie usloviy ekstraktsii na antioksidantnye svoystva izvlechenykh fitofenolov / N.Yu. Gribova // Metody i ob'ekty himicheskogo analiza. – 2012. – Т. 7. № 4. – С. 202–206.
11. Filippenko T.A. Antioksidantnoe deystvie ekstraktov lekarstvennykh rasteniy i fraktsiy ih fenol'nykh soedineniy / T.A. Filippenko, N.Yu. Gribova // Himiya rastitel'nogo syr'ya. – 2012. – № 1. – С. 77–81.
12. Filippenko T.A. Antioksidantnaya aktivnost' aminokislot pri okislenii podsolnechnogo masla v emul'sii / T.A. Filippenko, N.Yu. Gribova // Himiko-farmaceuticheskiy zhurnal. – 2012. – Том 45, № 5. – С. 40–42.
13. Hibbert D.B. Method validation, in Encyclopedia of Analytical Science. Quality Assurance: Elsevier Ltd, 2nd Edition, 2004. 350 p.
14. Concerning the Performance of Analytical Methods and the Interpretation of Result (Commission Decision 2002/657/EC [12 August Implementing Council Directive 96/23/EC]. European Commission. – Brussels, 2002.
15. Guidance document on analytical quality control and method validation procedures for pesticides residues analysis in food and feed (SANTE/11813/2017). 2017.

Рецензія/Peer review : 14.3.2019 р.

Надрукована/Printed : 2.6.2019 р.
Рецензент: д.х.н., проф. Максим В.І.

РАДІОТЕХНІКА, ЕЛЕКТРОНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

DOI 10.31891/2307-5732-2019-273-3-82-91
УДК 519.816

В.А. ДРУЖИНІН, В.І. КОРСУН, К.А. СОКОЛОВ
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Ю.М. БОЙКО, О.Ю. БОГОМОЛ
Хмельницький національний університет

**МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ МІСЦЕЗНАХОДЖЕННЯ
ДЖЕРЕЛ РАДІОЗАВАД В УМОВАХ ПАСИВНОЇ ЛОКАЦІЇ**

В роботі проведено аналіз впливу руху приймальних елементів системи моніторингу на її функціональні можливості щодо просторово-часової обробки сигналів від апріорно невідомих стаціонарних джерел радіовипромінювання (ДРВ) та запропоновано методику визначення координат їх розташування в пасивному режимі моніторингу із неспрямованим прийомом. Запропонований метод переслідування «ведучий-відомий» на інтервалі часу моніторингу для однозначного визначення пеленгів на джерела радіовипромінювання в пасивному режимі під час руху радіоприймачів із апріорно визначеною просторовою конфігурацією.

Ключові слова: радіомоніторинг, апертура, просторово-часова обробка, радіоприймальний модуль, доплерівська частота.

V.A. DRUZHININ, V.I. KORSUN, K.A. SOKOLOV
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
J.M. BOIKO, O.YU. BOHOMOL
Khmelnitskyi National University

**METHOD FOR DETERMINING THE LOCATION OF SOURCES
OF RADIO INTERFERENCE IN PASSIVE LOCATION**

In this work, an analysis of the influence of the motion of the receiving elements of the monitoring system on its functionality regarding spatial and temporal processing of signals from a priori unknown stationary sources of radio emission has been analyzed, and a method for determining the coordinates of their location in the passive mode of monitoring with non-directional reception is proposed. The proposed method of prosecution is "leading-known" in the interval of monitoring time for unambiguous determination of distances on radio sources in the passive mode when moving radio receivers with a priori defined spatial configuration. Mobile monitoring facilities functionally complement the stationary and provide flexible support for effective radio monitoring during measurements of radio frequency parameters beyond the area of access to them. The tasks of the radio monitoring can be solved by using passive radar systems, which may include not one, but a few spaced radio-controlled receiving modules. A prerequisite for solving the task of determining the coordinate's sources of radio emission by the system under consideration is the availability of at least three mobile radio receivers modules in the interval of monitoring time. In this system, information received by individual radar detectors is handled jointly. The algorithms considered in the work allow us to determine the coordinates of radio emission sources in the passive mode under conditions of non-directional reception. It should be noted that the implementation of the above algorithms is economically more expedient in comparison with space radio monitoring systems that solve similar technical problems. The efficiency of the application of the dynamical models considered in the work depends not only on the parameters of the radio receiver modules, but also on the signal parameters of the radio emission source. If the phase structure of the signal is not destroyed throughout the spatial-temporal interval of monitoring, then due to the use of a priori known information about the parameters of the movement of radar meters can significantly improve the efficiency of the system in solving the problem.

Keywords: radio monitoring, aperture, space-time processing, radio receiver module, Doppler frequency.

Вступ. Постановка завдання. В умовах сучасної електромагнітної обстановки значно ускладнюється задача пошуку завад, джерела яких маскуються нерегулярним характером використання радіочастотного ресурсу.

Джерелами завад можуть бути як легальні, так і нелегальні передавачі, які не дотримуються встановлених для технологій параметрів випромінювання і обмежень, що накладаються за результатами розрахунків сумісності з передавачами у сусідніх смугах частот іншого оператора. Ідентифікація передавачів за даними ідентифікаторів мережі і окремих базових станцій/секторів дозволить провести більш детальний аналіз спектру сигналів в оточуючому середовищі місця прояву завади і виявити сигнал завади від нелегального передавача (того ж репітера).

Загалом, для пошуку джерела завади необхідно зменшити загальну невизначеність у параметрах випромінювання передавачів мережі за рахунок використання додаткової інформації щодо випромінювання джерела завади, отриманої від заявника і, також, шляхом попереднього вимірювання у місті проявів завади.

У цьому випадку за рахунок підвищення потужності сигналу завади поряд із потужністю корисного сигналу у приймачі радіоконтролю виникає можливість прицільного, більш детального аналізу спектру сигналу завади і, таким чином, забезпечити більшу точність і надійність результатів аналізу спектра і вимірювань.

Таким чином, пошук джерела завади в умовах нерегулярного використання радіочастотного ресурсу вимагає тривалої, кропіткої роботи і уявляється складним і актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомо [1–4], що динамічні умови роботи систем радіомоніторингу істотно впливають на ефективність їх практичного використання. Особливо це стосується

пасивних систем радіомоніторингу.

Припустимо, що дистанційно пілотований літальний апарат (ДПЛА) із радіоприймальним модулем (РПрМ) на борту рухається в фіксованому напрямку з постійною швидкістю $\vec{V}_{РПрМ}$.

У певний момент часу t_1 сигнал, який випромінюється апріорно невідомим джерелом, надходить з невідомого раніше напрямку під кутом α_1 на вхід антенного пристрою РПрМ (рис. 1).

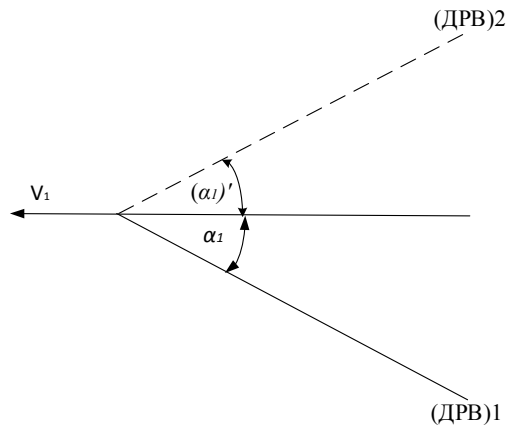


Рис. 1. Ілюстрація неоднозначного визначення напрямку приходу сигналу від ДРВ в умовах неспрямованого прийому

В даному випадку вираз для несучої частоти прийнятого сигналу має вигляд [3]:

$$f_{(n)np} = f_n \left(1 + \frac{V_{РПрМ}}{c} \cos \alpha_1 \right), \quad (1)$$

де f_n – частота несучого коливання сигналу; c – швидкість світла; $V_{РПрМ}$ – швидкість руху РПрМ ДПЛА.

Якщо частота несучого коливання сигналу f_n і швидкість руху РПрМ V апріорно відомі, то після вимірювання $f_{(n)np}$ може бути визначений пеленг на джерело радіовипромінювання (кут α):

$$\alpha_1 = \arccos \left[\frac{c}{L/T} \left(\frac{f_{(n)np}}{f_n} - 1 \right) \right] \quad (2)$$

Слід відзначити, що точність визначення пеленгу на джерело радіовипромінювання (ДРВ) залежить від величини відстані L (синтезованої апертури), яку проходить РПрМ за час моніторингу T . Перевагою таких систем є те, що вони забезпечують високу точність вимірювання напрямку приходу сигналу при використанні антен з малою апертурою.

Однак, визначення пеленга на ДРВ, в даному випадку, можливо лише при апріорно відомому спектрі радіовипромінювання.

Можливість роботи тільки в умовах, коли спектр сигналу ДРВ апріорно відомий, серйозно обмежує застосування систем моніторингу з синтезованою апертурою.

Дана ситуацію може бути змінена у випадку, якщо швидкість РПрМ змінна в часі за модулем або за напрямком. Тоді доплерівська частота також буде змінюватися на інтервалі часу моніторингу T .

Якщо РПрМ переміщається в фіксованому напрямку зі змінною за величиною швидкістю $V(t)$, то оді гармонійна хвиля з частотою f_n реєструється на виході приймального елемента як частотно-модульоване коливання. Його частота є функцією часу, яка описується наступним виразом [3]:

$$f_{np} = f_n \left(1 + \frac{V(t)}{c} \cos \alpha_1 \right) \quad (3)$$

Якщо швидкість руху приймального елемента $V(t)$ змінюється за гармонійним законом з частотою f_z , то вираз (3) може бути представлено у вигляді [3]:

$$f_{np} = f_n \left(1 + \frac{V_0}{c} \cos(2\pi f_z t) \cos \alpha_1 \right) \quad (4)$$

де V_0 – амплітуда швидкості руху РПрМ.

Амплітуда зміни доплерівської частоти реєстрованих коливань (F_D) та середня частота цих коливань ($f_{сер}$) визначаються наступним чином [3]:

$$\begin{cases} F_D = f_n \frac{V_0}{c} \cos \alpha_1 \\ f_{сер} = f_n \end{cases} \quad (5)$$

Частота сигналу і кут його приходу можуть бути визначені в даному випадку на основі вимірів амплітуди зміни частоти і середньої частоти реєстрованих коливань.

Точність вимірювання кута приходу коливання залежить від амплітуди швидкості переміщення приймального елемента. Слід зазначити, що даний ефект буде мати місце і в випадках зміни швидкості руху РПрМ за законами, що відрізняються від гармонійного.

Розглянемо випадок, коли РПрМ протягом часу t_1 рухається в фіксованому напрямку з постійною швидкістю V_1 , а потім протягом часу t_2 – у зміненому напрямку з постійною швидкістю V_2 (рис. 2)

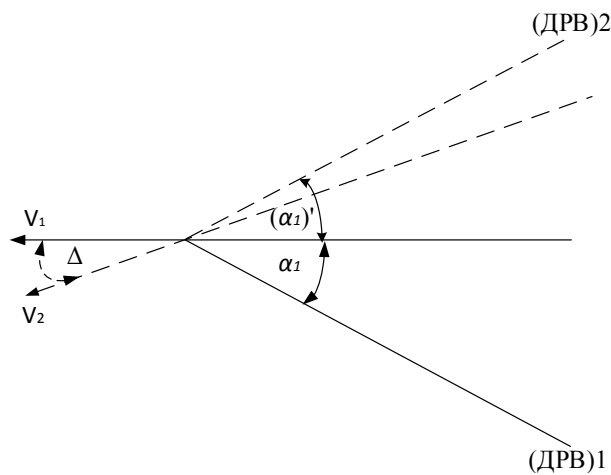


Рис. 2. Геометричне співвідношення кутів при зміні напрямку руху носія РПрМ

Особливістю двох перших моделей (1), (4) є неоднозначність вимірювання напрямків: сигнали, що приходять з симетричних напрямків (під кутами α_1 і α_2) (рис. 1), невизначні.

В даному випадку (рис. 3) ситуація відрізняється від раніше розглянутих.

При русі РПрМ в першому напрямку реєстрована доплерівська частота описується виразом:

$$F_{D1} = f_n \frac{V_1}{c} \cos \alpha_1, \quad (6)$$

а при русі у зміненому напрямку (рис. 2):

$$F_{D2} = f_n \frac{V_2}{c} \cos(\alpha_1 + \Delta). \quad (7)$$

Якщо V_1 , V_2 , Δ – апріорно визначаються просторовою конфігурацією системи радіомоніторингу, а F_{np1} і F_{np2} – величини, які вимірюються, тоді напрямок приходу сигналу від ДРВ та його частота можуть бути однозначно визначені на підставі наведених виразів.

В даному випадку точність виміру параметрів сигналу від ДРВ залежить від величин швидкостей V_1 , V_2 та кута Δ .

На підставі розглянутого вище математичного апарату в роботі пропонується динамічна модель просторово-часової обробки сигналів від ДРВ в умовах їх рознесеного прийому рухомими РПрМ із апріорно відомими просторовими характеристиками на інтервалі часу моніторингу.

На цей час, мобільні засоби моніторингу спроможні функціонально доповнювати стаціонарні й забезпечують гнучку підтримку ефективного радіомоніторингу при проведенні вимірювань параметрів радіовипромінювань поза зоною доступу до них за рахунок використання потенційних можливостей методів синтезу апертур пасивних систем [5–13].

На рис. 3 наведена ілюстрація просторового положення точок прийому сигналу (A і B) відносно ДРВ. В даному випадку моніторинг ДРВ реалізується двома рухомими РПрМ, які пересуваються зі

швидкостями V_1, V_2 та знаходяться на відстані (дистанції) один від одного. Точки прийому сигналу (А і В) з напрямів α_1, α_2 знаходяться в межах головної пелюстки діаграми спрямованості антени ДРВ в вертикальній та горизонтальній площинах.

Вхідні дані: 1. Координати точок знаходження РПрМ1 та РПрМ2 на інтервалі часу моніторингу ДРВ.

2. Час затримки (t_3) приходу сигналу в точку В відносно часу приходу радіовипромінювання від ДРВ в точку А.

3. Дистанція (d) – незмінна на інтервалі часу моніторингу (T) ДРВ.

4. $V_1 = V_2$.

Наукове завдання: На підставі наведених вхідних даних визначити координати точки стояння ($x_{ДРВ}; y_{ДРВ}$) ДРВ в пасивному режимі моніторингу.

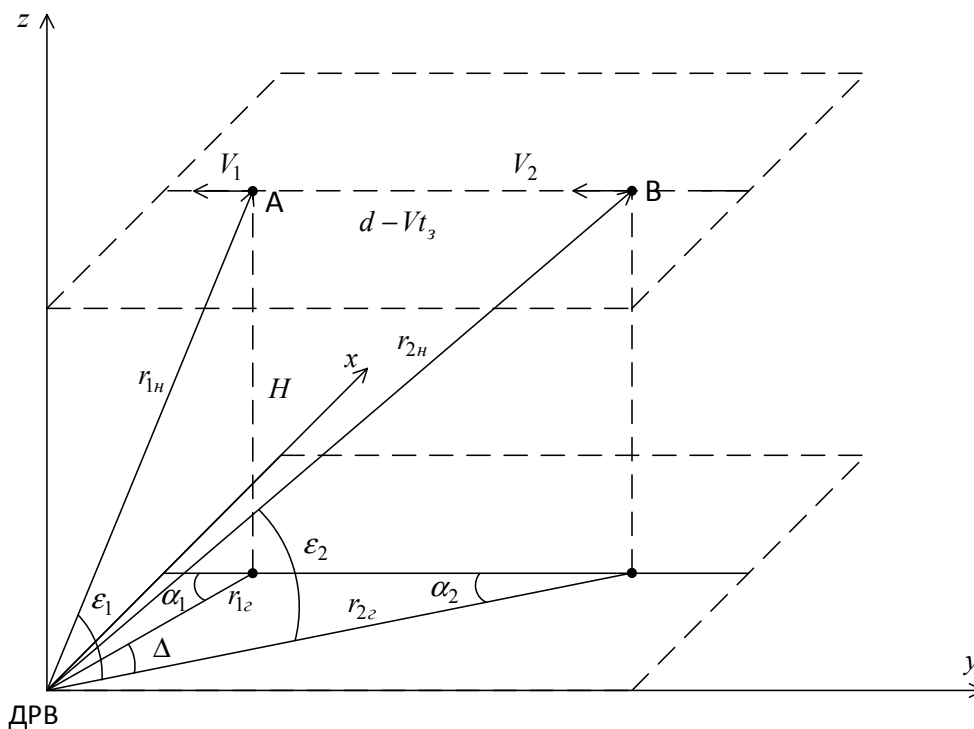


Рис. 3. Геометричне співвідношення кутів при зміні напрямку руху носія РПрМ

Алгоритм визначення координат точки стояння ($x_{ДРВ}; y_{ДРВ}$) ДРВ в пасивному режимі моніторингу

На підставі використання рівняння передачі Гарольда-Фрііса отримаємо вираз для розрахунку похилої дальності r_{1n} до ДРВ, який має вигляд:

$$r_{1n} = \frac{ct_3 \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{1/2}}{1 - \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{1/2}}, \tag{8}$$

де t_3 – час затримки приходу сигналу до другого приймального елемента відносно першого; P_1, P_2 – потужності сигналу від ДРВ, які отримані приймальними антенами РПрМ1 та РПрМ2.

Слід відзначити, що похилі дальності до першого та другого приймальних елементів зв'язані співвідношенням:

$$r_{2n} = r_{1n} + ct_3, \tag{9}$$

де r_{1n} – похила дальність до першого приймального елемента відносно точки знаходження джерела радіовипромінювання;

r_{2H} – похила дальність до другого приймального елемента відносно точки знаходження джерела радіовипромінювання; c – швидкість світла.

Відповідно, математичні вирази для розрахунку кутів місця в точках прийому A і B (рис. 3) мають вигляд:

$$\varepsilon_1 = \arcsin\left(\frac{H}{r_{1H}}\right), \tag{10}$$

де H – висота знаходження радіоприймача в момент прийому сигналу від джерела радіовипромінювання (рис. 3).

$$\varepsilon_2 = \arcsin\left(\frac{H}{r_{2H}}\right). \tag{11}$$

Вирази для розрахунку значень проєкцій похилих дальностей від ДРВ до точок A і B на горизонтальну площину згідно з рис. 3 мають вигляд:

$$r_{1z} = \frac{H}{\operatorname{tg}(\varepsilon_1)} = \frac{H}{\operatorname{tg}\left(\arcsin\left(\frac{H}{r_{1H}}\right)\right)} = \frac{H\sqrt{1-\left(\frac{H}{r_{1H}}\right)^2}}{\left(\frac{H}{r_{1H}}\right)} = \sqrt{r_{1H}^2 - H^2}. \tag{12}$$

$$r_{2z} = \frac{H}{\operatorname{tg}(\varepsilon_2)} = \frac{H}{\operatorname{tg}\left(\arcsin\left(\frac{H}{r_{2H}}\right)\right)} = \frac{H\sqrt{1-\left(\frac{H}{r_{2H}}\right)^2}}{\left(\frac{H}{r_{2H}}\right)} = \sqrt{r_{2H}^2 - H^2}. \tag{13}$$

З врахуванням виразів (9)–(10) розраховується кут між напрямками на точки прийому сигналів відносно точки розташування джерела радіовипромінювання в горизонтальній площині (рис. 3):

$$\Delta = \arccos\left[\frac{r_{1z}^2 + r_{2z}^2 - (d - Vt_3)^2}{2 \cdot r_{1z} \cdot r_{2z}}\right] = \arccos A_\Delta \tag{14}$$

У даному випадку, коли параметри V_1 , V_2 , (d – дистанція між носіями радіоприймачів в точках A і B на рис. 3) априорно відомі, кут Δ – визначається згідно формули (14), а f_{np1} і f_{np2} – вимірюються, то напрямки приходу сигналів та його несуча частота однозначно визначаються виразами (16)–(17) на підставі вирішення системи наведених нижче рівнянь:

$$\begin{cases} f_{np1} = f_H \left[1 + \frac{V_1}{c} \cos \alpha_1 \right] \\ f_{np2} = f_H \left[1 + \frac{V_2}{c} \cos(\alpha_1 + \Delta) \right] \\ \alpha_2 = \alpha_1 + \Delta, V_1 = V_2 = V \end{cases} \tag{15}$$

$$\Delta = \arccos\left[\frac{r_{1z}^2 + r_{2z}^2 - (d - Vt_3)^2}{2 \cdot r_{1z} \cdot r_{2z}}\right] = \arccos A_\Delta, \quad \frac{f_{np1}}{f_{np2}} = \frac{\left[1 + \frac{V}{c} \cos \alpha_1 \right]}{\left[1 + \frac{V}{c} \cos(\alpha_1 + \Delta) \right]};$$

$$f_{np1}A_{\Delta} \cos(\alpha_1) - f_{np1}\sqrt{1 - A_{\Delta}^2} \sin(\alpha_1) - f_{np2} \cos \alpha_1 = \frac{c(f_{np2} - f_{np1})}{V}$$

Позначимо:

$$A \cos \alpha_1 - B\sqrt{1 - \cos^2 \alpha_1} - C \cos \alpha_1 = G; \cos \alpha_1 = t;$$

$$f_{np1}A_{\Delta} = f_{np1} \left[\frac{r_{1z}^2 + r_{2z}^2 - (d - Vt_3)^2}{2 \cdot r_{1z} \cdot r_{2z}} \right] = A$$

$$f_{np1}\sqrt{1 - A_{\Delta}^2} = f_{np1} \sqrt{1 - \left[\frac{r_{1z}^2 + r_{2z}^2 - (d - Vt_3)^2}{2 \cdot r_{1z} \cdot r_{2z}} \right]^2} = B$$

$$f_{np2} = C$$

$$\frac{c(f_{np2} - f_{np1})}{V} = G$$

$$(A^2 + C^2 + B^2)t^2 + (2CG - 2AC - 2AG)t + (G^2 - B^2) = 0$$

$$t_{1,2} = \frac{-(2CG - 2AC - 2AG) \pm \sqrt{(2CG - 2AC - 2AG)^2 - 4(A^2 + C^2 + B^2)(G^2 - B^2)}}{2(A^2 + C^2 + B^2)}$$

Введемо обмеження: $\begin{cases} -1 \leq t \leq 1 \\ 0 \leq \alpha_1 \leq \pi \end{cases}$

Таким чином, вирази для обчислення кута пеленгу на ДРВ та несучої частоти мають вигляд:

$$\alpha_1 = \arccos t \tag{16}$$

$$f_H = \left[\frac{f_{np1}}{1 + \frac{V}{c} \cos \alpha_1} \right] \tag{17}$$

На рис. 4. представлено блок-схему алгоритму визначення пеленгів на ДРВ (α_1, α_2) та його несучої частоти (f_H).

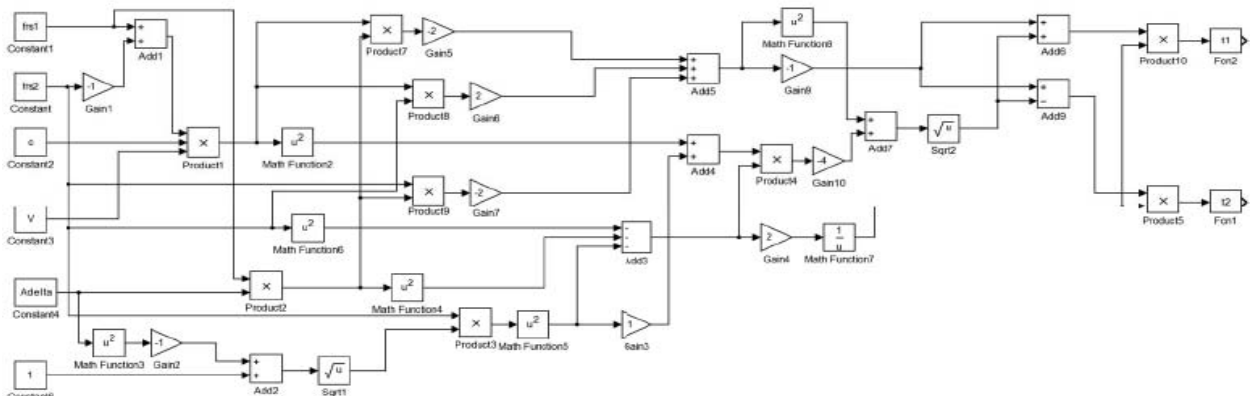


Рис. 4. Блок-схема алгоритму визначення пеленгів на ДРВ (α_1, α_2) та його несучої частоти (f_H)

Реалізація просторового положення точок прийому сигналу (А і В) відносно ДРВ (рис. 4) може бути вирішена за рахунок відповідного радіокерування носіями РПрМ та зводиться до визначення і передачі команд керування (КК) на борт веденого носія РПрМ із фіксованим запізненням відносно КК ведучого об'єкта.

Ця задача характеризується тим, що керування польотом здійснюється безперервно на всій траєкторії руху групи носіїв РПрМ. Для спрощення сприйняття визначена задача розглядається в одній площині.

Положення ведучого і веденого носія РПрМ визначиться у інерціальній системі координат з вісями $H, P, D(\vec{V})$. Ведучий носій РПрМ (НРПрМ) рухається зі швидкістю \vec{V}_1 на висоті H_1 .

За умови, що вісь ОХ системи прямокутних координат ХОУ, наведеної на рис. 5, орієнтована паралельно траєкторії руху приймальних елементів системи радіомоніторингу, в центрі якої розташований наземний пункт збору та обробки радіолокаційної інформації (НПЗОРЛІ), координати точки розташування джерела радіовипромінювання можуть бути розраховані таким чином:

$$\begin{cases} x_{ДРВ} = x_1 - \sqrt{r_{1н}^2 - H^2} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{c}{V_1}\right)^2 \left[\frac{f_{np1}}{f_n} - 1\right]^2} \\ y_{ДРВ} = y_1 + \sqrt{r_{1н}^2 - H^2} \cdot \frac{c}{V_1} \left[\frac{f_{np1}}{f_n} - 1\right] \end{cases} \quad (18)$$

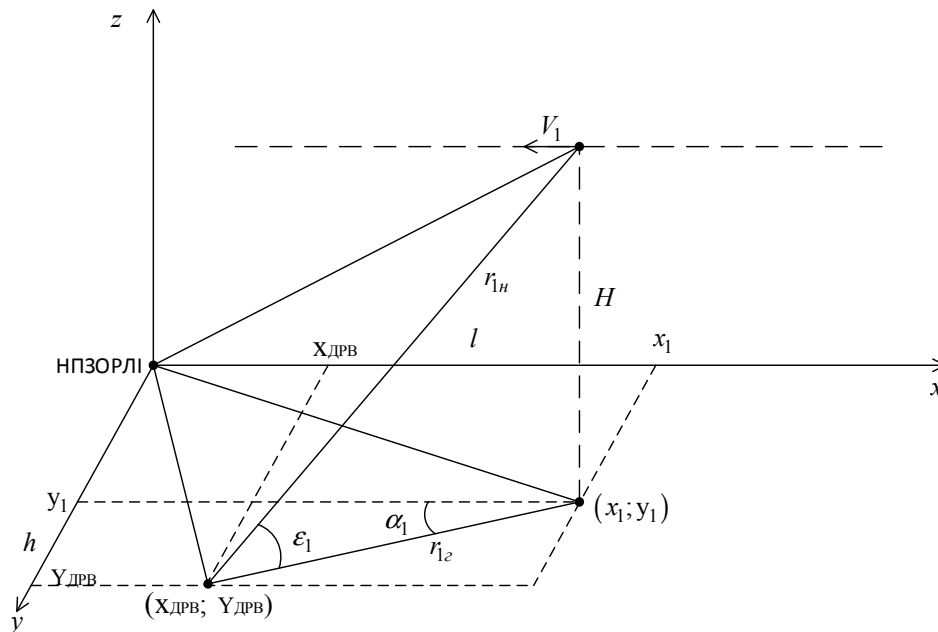


Рис. 5. Орієнтація руху РПрМ відносно вісі ОХ

Аналогічно швидкість веденого $\vec{V}_2 = \vec{V}_1$, а напрямком його руху співпадає з напрямком ведучого. З цього випливає, що кут нахилу траєкторії $\hat{\theta}$ дорівнює курсовому куту ведучого. Це справедливо у випадку, якщо кут атаки дорівнює нулю. Для цього випадку кінематичні співвідношення показані на рис. 6.

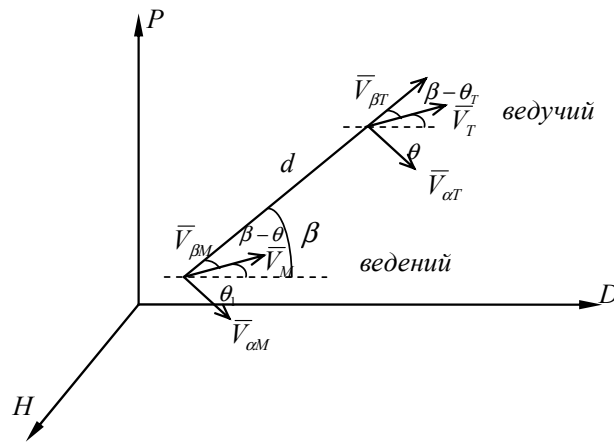


Рис. 6. Графічна інтерпретація кінематичних співвідношень при русі ведучого та веденого носія РПРМ

Кут лінії візування на рис. 6 позначений β , відстань між ведучим та веденим – d , проекції векторів швидкості ведучого та веденого на лінію візування – $V_{\beta T}$, $V_{\beta M}$, а до нормалі до лінії візування – $V_{\alpha T}$, $V_{\alpha M}$.

Призначення системи утримання (СУ) веденого на потрібній траєкторії (наведення) полягає у формуванні таких КК (на автопілот), які будуть забезпечувати утримання веденого за ведучим навіть при маневруванні останнього.

Припустимо, що система утримання буде відпрацьовувати вхідний сигнал, що дорівнює (пропорційний) куту лінії візування β або швидкості візування $\dot{\beta}$.

За такими вхідними сигналами можлива реалізація тільки одного закону керування, що може використовуватися для утримання веденого – це переслідування.

У цьому випадку ведений НПРМ завжди знаходиться прямо за ведучим, тобто $\theta = \beta$.

У випадку відсутності маневру це означає, що ведений рухається з постійною бічною швидкістю, а при сталій поздовжній швидкості буде забезпечуватися «ідеальна» дистанція між двома об'єктами по прямій лінії.

У відповідності до рис. 6 кінематичні співвідношення мають вигляд:

$$\begin{aligned} V_{\beta T} - V_{\beta M} &= V_T \cos(\beta - \theta_T) - V_M \cos(\beta - \theta) = \dot{d} \\ d &= d_0 + \dot{d} \Delta t \end{aligned} \quad (19)$$

а кутові відхилення

$$\begin{aligned} \dot{\beta} &= -\frac{V_{\alpha T} - V_{\alpha M}}{d} = -\frac{V_T \sin(\beta - \theta_T) - V_M \sin(\beta - \theta)}{d} \\ \beta &= \beta_0 + \dot{\beta} \Delta t \end{aligned} \quad (20)$$

Метод «чистого» переслідування буде визначатися тим, що ані ведучий, ані ведений не маневрують. При цьому $V_T = const$, а $\theta_T = 0$, $\theta = \beta$.

У цьому випадку

$$\begin{aligned} \frac{d(d)}{dt} &= V_T \cos \beta - V_M = \dot{d}; \\ \dot{\beta} &= \frac{d\beta}{dt} = -\frac{V_T \sin \beta}{d}. \end{aligned} \quad (21)$$

При цьому $\dot{\beta}$ буде дорівнювати нулю тільки коли $\beta = 0$ або π , тобто переслідування відбувається точно «в хвіст».

Рішення для β і кута нахилу траєкторії - θ як функції зміни дистанції d має вигляд:

$$\frac{d(d)}{d\beta} = \left(-\operatorname{ctg} \beta + \frac{V_M}{V_T} \operatorname{cosec} \beta \right) d \rightarrow \frac{d(d)}{dt} = (-\operatorname{ctg} \beta + \gamma \operatorname{cosec} \beta) d \dot{\beta}, \quad (22)$$

де $\gamma = \frac{V_M}{V_T}$ – співвідношення швидкостей ведучого і веденого НПРМ.

Обернене перетворення виразу (22) має вигляд:

$$\ln d = -\ln |\sin \beta| + \gamma \ln \left| \operatorname{tg} \frac{\beta}{2} \right| + \text{const} . \quad (23)$$

Якщо припустити, що $0 \leq \beta < \pi$, то

$$\ln \frac{d \sin \beta}{\operatorname{tg} \left(\frac{\beta}{2} \right)^\gamma} = \text{const} . \quad (24)$$

або

$$\frac{d \sin \beta}{(\operatorname{tg} \beta / 2)^\gamma} = \frac{d_0 \sin \beta}{(\operatorname{tg} \beta_0 / 2)^\gamma} = k = \lambda \quad (25)$$

де d_0 і β_0 – потрібні значення дистанції і кута візування веденого відносно ведучого НРПРМ.

Так як ведучий і ведений повинні бути на одній лінії, то β наближається до нуля, а $k = \lambda$ повинні бути постійними.

Точний вивід «у хвіст» ведучому НРПРМ відбудеться за умови: $\beta = \theta = 0$.

$$\dot{\beta} = -\frac{V_T (\sin \beta)^2}{\lambda \left(\frac{\operatorname{tg} \beta}{2} \right)^\gamma} .$$

При цьому кутова швидкість визначається так:

$$\dot{\beta} = -\frac{V_T (\sin \beta)^2}{\lambda \left(\frac{\operatorname{tg} \beta}{2} \right)^\gamma} .$$

На ділянці траєкторії, де $\beta \ll 1$, $\sin \beta \approx \beta$, $\operatorname{tg} \frac{\beta}{2} \approx \frac{\beta}{2}$, вираз для кутової швидкості має вигляд:

$$\dot{\beta} \approx \frac{2^\gamma (V_T)}{\lambda} - \gamma . \quad (26)$$

Висновки

Мобільні засоби моніторингу функціонально доповнюють стаціонарні і забезпечують гнучку підтримку ефективного радіомоніторингу при проведенні вимірювань параметрів радіовипромінювань поза зоною доступу до них.

Використання мобільних систем радіомоніторингу на базі рухомих радіокерованих модулів для вирішення відповідних практичних завдань дозволяє більш успішно здійснювати контроль радіочастотного спектру і виявляти незареєстровані радіовипромінювання.

У зв'язку з цим, актуальними залишаються питання щодо потенційних можливостей методів синтезу апертур пасивних систем радіомоніторингу.

Завдання радіомоніторингу можуть бути вирішені і за допомогою використання пасивних радіолокаційних систем, до складу яких може входити не одне, а декілька рознесених в просторі радіокерованих приймальних модулів.

Необхідною умовою для розв'язання задачі визначення координат ДРВ розглянутою системою є наявність не менше трьох рухомих радіоприймальних модулів на інтервалі часу моніторингу.

У даній системі інформація, що отримується окремими радіолокаційними вимірювачами, обробляється спільно.

Розглянуті в роботі алгоритми дозволяють визначати координати джерел радіовипромінювання в пасивному режимі в умовах неспрямованого прийому.

Слід зазначити, що реалізація наведених алгоритмів економічно більш доцільна в порівнянні з космічними системами радіомоніторингу, які вирішують аналогічні технічні завдання.

Ефективність застосування розглянутих в роботі динамічних моделей залежить не тільки від параметрів радіоприймальних модулів, але й параметрів сигналу джерела радіовипромінювання.

Значну роль при цьому відіграє співвідношення між параметрами руху антен радіоприймальних модулів і інтервалами когерентності сигналу.

Якщо фазова структура сигналу не зруйнована на всьому просторово-часовому інтервалі моніторингу, то за рахунок використання апріорно відомої інформації про параметри руху радіолокаційних вимірювачів можна суттєво підвищити ефективність системи в ході розв'язання розглянутої задачі.

Література

1. Дружинін В. А. Проблеми формування та обробки радіолокаційної інформації в системах радіобачення : монографія / В. А. Дружинін. – Київ : Логос, 2013. – 230 с.
2. Методи та алгоритми обробки і захисту інформації в радіолокаційних системах із змінною просторовою конфігурацією : монографія / В. А. Дружинін, С.В. Толопа, В.С. Наконечний, Н.В. Цюпа, Є.В. Батрак. – Київ : Логос, 2014. – 251 с.
3. Горбань І. І. Обробка гідроакустичних сигналів у складних динамічних умовах : монографія / І. І. Горбань. – Київ : Науково-виробниче підприємство «Видавництво «Наукова думка» НАН України», 2008. – 270 с.
4. Караваев В. В. Статистическая теория пассивной локации / В. В. Караваев, В. В. Сазонов. – М. : Радио. 1987. – 240 с.
5. Hayes M.P., Gough P.T. Synthetic aperture sonar: a review of current status. IEEE J. Ocean. Eng. 2009. V. 34. № 3. P. 207–224.
6. Autrey S.W. Passive synthetic arrays. IEEE J. Ocean. Eng. 1988. V. 84. № 2. P. 592–598.
7. Stergiopoulos S. Optimum bearing resolution for a moving towed array and extension of its physical aperture. The Journal of the Acoustical Society of America. 1990. V. 87, № 5. P. 2128–2140.
8. Edelson G.S., Tufts D.W. On the ability to estimate narrow-band signal parameters using towed arrays. IEEE Journal of Oceanic Engineering. 1992. V. 17, № 1. P. 48–61.
9. Ivanenkov A.S., Korotin P.I., Orlov D. A., Rodionov A.A., Turchin V.I. Cramer–Rao lower bound for localization of a source with partial temporal coherence using passive synthetic aperture. Proc. of the 12th European Conference on Underwater Acoustics. 2012. Edinburgh, United Kingdom. P. 564–571.
10. I.R. Parhomey, J.M. Boiko and O.I. Eromenko (2016, Aug.). Features of digital signal processing in the information control systems of multipositional radar. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. 2(77): 75–84. DOI: 10.5604/17348412.1230101.
11. Пархомей І. Р. Особливості функціонування радіолокаційних систем локації об'єктів з низькою поверхнею віддзеркалення / І. Р. Пархомей, Ю. М. Бойко // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2015. – № 5. – С. 194–201. – URL : http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vchnu_tekh_2015_5_39.
12. Boiko J. Automated control system radar work [Electronic resource] / J. Boiko, I. Parhomey // Матеріали XIII міжнародної конференції "Контроль і управління в складних системах (КУСС-2016)", м. Вінниця, 3–6 жовтня 2016 р. – Вінниця : ВНТУ, 2016. – URL : <http://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/13052>.
13. Науково-прикладні питання забезпечення роздільної здатності і ефективності обробки сигналів у радіотехнічних та телекомунікаційних системах за наявності завад : монографія / Ю. М. Бойко, О. М. Шинкарук, Л. В. Карпова, І. І. Чесановський. – Хмельницький : ХНУ, 2019. – 218 с. – URL : <http://elar.khnu.km.ua/jspui/handle/123456789/7556>.

References

1. Druzhynin V. A. Problemy formuvannya ta obrobky radiolokatsiinoi informatsii v systemakh radiobachennia : monohrafiia / V. A. Druzhynin. – Kyiv : Lohos, 2013. – 230 s.
2. Metody ta alhorytmy obrobky i zachystu informatsii v radiolokatsiinykh systemakh iz zminnoiu prostorovoiu konfiguriatsiieiu : monohrafiia / V.A. Druzhynin, S.V. Toliupa, V.S. Nakonechnyi, N.V. Tsopa, Ye.V. Batrak. – Kyiv : Lohos, 2014. – 251 s.
3. Horban I.I. Obrobka hidroakustychnykh syhnaliv u skladnykh dynamichnykh umovakh : monohrafiia / I.I. Horban. – Kyiv : Naukovo-vyrobnyche pidpriemstvo «Vydavnytstvo «Naukova dumka» NAN Ukrainy», 2008. – 270 s.
4. Karavaev V.V. Statisticheskaya teoriya passivnoy lokatsii / V.V. Karavaev, V.V. Sazonov. – M. : Radio. 1987. – 240 s.
5. Hayes M.P., Gough P.T. Synthetic aperture sonar: a review of current status. IEEE J. Ocean. Eng. 2009. V. 34. № 3. P. 207–224.
6. Autrey S.W. Passive synthetic arrays. IEEE J. Ocean. Eng. 1988. V. 84. № 2. P. 592–598.
7. Stergiopoulos S. Optimum bearing resolution for a moving towed array and extension of its physical aperture. The Journal of the Acoustical Society of America. 1990. V. 87, № 5. P. 2128–2140.
8. Edelson G.S., Tufts D.W. On the ability to estimate narrow-band signal parameters using towed arrays. IEEE Journal of Oceanic Engineering. 1992. V. 17, № 1. P. 48–61.
9. Ivanenkov A.S., Korotin P.I., Orlov D. A., Rodionov A.A., Turchin V.I. Cramer–Rao lower bound for localization of a source with partial temporal coherence using passive synthetic aperture. Proc. of the 12th European Conference on Underwater Acoustics. 2012. Edinburgh, United Kingdom. P. 564–571.
10. I.R. Parhomey, J.M. Boiko and O.I. Eromenko (2016, Aug.). Features of digital signal processing in the information control systems of multipositional radar. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. 2(77): 75-84. DOI: 10.5604/17348412.1230101.
11. Parkhomey I. R. Features of objects radar systems ranging from low reflection surface / I. R. Parkhomey, J. M. Boiko // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2015. – № 5. – S. 194–201. – URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vchnu_tekh_2015_5_39.
12. Boiko J. Automated control system radar work [Electronic resource] / J. Boiko, I. Parhomey // Materialy XIII mizhnarodnoi konferentsii "Kontrol i upravlinnia v skladnykh systemakh (KUSS-2016)", m. Vinnytsia, 3–6 zhovtnia 2016 r. – Vinnytsia : VNTU, 2016. – URL: <http://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/13052>.
13. Naukovo-prykladni pytannia zabezpechennia rozdilnoi zdatnosti i efektyvnosti obrobky syhnaliv u radiotekhnichnykh ta telekomunikatsiinykh systemakh za naiavnosti zavod : monohrafiia / J. M. Boiko, O. M. Shynkaruk, L. V. Karpova, I. I. Chesanovskyi. – Khmelnytskyi : KhNU, 2019. – 218 s. – URL: <http://elar.khnu.km.ua/jspui/handle/123456789/7556>.

Г.Г. БОРТНИК, М.В. ВАСИЛЬКІВСЬКИЙ, А.В. КОВАЛЕНКО

Вінницький національний технічний університет

ЦИФРОВИЙ МЕТОД СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ШИРОКОСМУГОВИХ СИГНАЛІВ

У роботі представлено високопродуктивний метод цифрового спектрального аналізу широкосмугових сигналів, який базується на процедурі розділення масиву досліджуваного сигналу на ряд підпоследовностей. Сформовані підпоследовності обробляються згідно з алгоритмом ШПФ. У рамках запропонованого методу отримано вирази для розрахунку параметрів структури ШПФ. Аналіз ефективності запропонованого методу підтвердив, що завдяки розробленому методу вдається підвищити продуктивність цифрового спектрального аналізу широкосмугових сигналів у $2\div 4,6$ разів залежно від об'єму аналізованої вибірки сигналу та довжини оброблюваної підпоследовності.

Ключові слова: широкосмугові сигнали, швидке перетворення Фур'є, спектральний аналіз, роздільна здатність.

G.G. BORTNYK, M.V. VASYLKIVSKYI, A.V. KOVALENKO

Vinnytsia National Technical University

DIGITAL METHOD OF SPECTRAL ANALYSIS WIDE-SIGNALS

Spectral analysis of broadband signals based on Fast Fourier Transformation (FFT) algorithms has a number of features associated with the required resolution in frequency and high processing performance. In this case, the direct application of FFT algorithms for the implementation of these conflicting requirements is a complex scientific and technical task. At the same time, when solving problems related to the spectral analysis of broadband signals in telecommunication and radio engineering systems that operate in real time, the productivity of existing methods and means of DSP is inadequate. The purpose of the work is to increase the productivity of the spectral analysis of broadband signals due to the partition of the implementation of the signal on a number of subsequences with subsequent processing in the frequency domain. The paper presents a high-performance method of digital spectral analysis of broadband signals, which is based on the procedure of separating the array of the investigated signal into a series of sub sequences. The formed subsequences are processed according to the FFT algorithm. In the framework of the proposed method, expressions were obtained for the calculation of parameters of FFT structure. The analysis of the efficiency of the proposed method confirmed that due to the developed method it is possible to increase the productivity of the digital spectral analysis of broadband signals in $2 \div 4.6$ times depending on the volume of the analyzed sample of the signal and the length of the processed subsequence. The maximum gain in productivity is achieved provided that the processed subsequence has a small length and the volume of the array of the investigated signal is large.

The proposed method can be used in telecommunication and radio engineering systems for the spectral analysis of broadband signals in real time mode.

Keywords: wide-signals, Fast Fourier Transformation, spectral analysis, resolution.

Вступ

Існуючі засоби спектрального аналізу широкосмугових сигналів базуються на використанні методів цифрового оброблення сигналів (ЦОС), а саме – алгоритмів швидкого перетворення Фур'є (ШПФ) [1]. Спектральний аналіз широкосмугових сигналів на базі алгоритмів ШПФ має ряд особливостей, що пов'язані з необхідною роздільною здатністю за частотою та високою продуктивністю оброблення [2]. При цьому безпосереднє застосування алгоритмів ШПФ для реалізації цих суперечливих вимог є складною науково-технічною задачею. Разом з тим, при розв'язанні задач, пов'язаних зі спектральним аналізом широкосмугових сигналів у телекомунікаційних і радіотехнічних системах, що функціонують у реальному масштабі часу, продуктивність існуючих методів і засобів ЦОС виявляється недостатньою [3].

Останнім часом запропоновано декілька модифікованих методів спектрального аналізу на базі алгоритмів ЦОС, які було розроблено для того, щоб послабити обмеження за продуктивністю, що властиві цифровим спектральним методам [4, 5]. У режимі роботи в реальному масштабі часу необхідно здійснювати оброблення широкосмугових сигналів, при якому не відбувається втрат відліків аналізованих сигналів і водночас не відбувається зростаючого від реалізації до реалізації їх накопичення. Незважаючи на певні результати, досягнуті у зазначених вище публікаціях, питання підвищення продуктивності цифрового спектрального аналізу широкосмугових сигналів як і раніше залишаються актуальними.

Наведена аргументація підтверджує своєчасність та актуальність поставленої науково-практичної задачі, розв'язання якої потребує розвитку методів та практичних положень для побудови засобів цифрового спектрального аналізу широкосмугових сигналів.

Метою роботи є підвищення продуктивності спектрального аналізу широкосмугових сигналів за рахунок розбиття реалізації сигналу на ряд підпоследовностей з подальшим їх обробленням у частотній області.

Основна частина

Критерієм широкосмуговості цифрового спектроаналізатора є коефіцієнт перекриття за частотою [6]

$$k_f = \frac{f_H}{f_L}, \quad (1)$$

де f_H, f_L – верхнє та нижнє значення частоти досліджуваного спектра сигналу.

Роздільна здатність за частотою характеризується коефіцієнтом відносного частотного розділення:

$$\beta = \frac{\Delta f}{f}, \quad (2)$$

де Δf – абсолютне розділення за частотою або частотний інтервал між двома сусідніми частотними складовими спектра.

Для методу спектрального аналізу на базі ШПФ абсолютне розділення за частотою є постійним у всьому діапазоні частот і дорівнює [5]:

$$\Delta f = \frac{f_s}{N}, \quad (3)$$

де f_s – частота дискретизації;

N – обсяг вибірки досліджуваного сигналу.

Максимальне значення коефіцієнта відносного розділення β_{\max} досягається на частоті f_L . З виразів (1) і (3) можна знайти граничне значення коефіцієнта відносного розділення:

$$\beta_{\max} = k_f \cdot \beta_{\min}. \quad (4)$$

З урахуванням теореми відліків можна записати:

$$k_f \leq \frac{N}{2};$$

$$\frac{2}{N} \leq \beta \leq 1. \quad (5)$$

Як зазначалось вище, вимоги забезпечення необхідних k_f і β є суперечливими. Нехай необхідно виконати спектральний аналіз ширококутового сигналу, спектр якого займає n декад, тобто $k_f = 10^n$, а максимальне значення коефіцієнта відносного розділення не повинно перевищувати заданого значення β_0 .

З виразу (4) маємо $k_f \cdot \beta_{\min} = k_f \frac{f_s}{N \cdot f_H} \leq \beta_0$. Звідси можна оцінити мінімальний обсяг вибірки сигналу для досягнення необхідного частотного розділення

$$N_{\min} \geq \frac{k_f \cdot f_s}{\beta_0 \cdot f}. \quad (6)$$

При реалізації цифрового методу спектрального аналізу ширококутових сигналів на базі ШПФ коефіцієнт відносного розділення за частотою знаходиться у межах $0,01 \leq \beta \leq 0,0001$ [2]. Тоді при $n = 5$ для значення $\beta_0 = 0,001$ отримаємо $N_{\min} \geq 2 \cdot 10^8$. При цьому у діапазоні високих частот коефіцієнт відносного розділення $\beta_{\min} = 10^{-8}$, що є надлишковим для спектрального аналізу ширококутових сигналів.

Для усунення недоліків класичного методу спектрального аналізу на базі ШПФ у роботі пропонується досліджувану реалізацію ширококутового сигналу поділити на ряд підпоследовностей. А для кожної з цих підпоследовностей необхідно задати параметри ШПФ.

Виконаємо попередню оцінку реального значення k_r для реалізації ШПФ підпоследовності обсягом M . У високочастотній частині спектра досліджуваного сигналу значення k_r обмежено відносною шириною частотної смуги фільтра нижніх частот (ФНЧ) $k_B = \frac{f_s}{f_H}$, що усуває ефект «накладання спектрів» [7]. Звідси

$$f_s = k_B \cdot f_H. \quad (7)$$

У низькочастотній частині спектра коефіцієнт k_B обмежено допустимим значенням β_{\max}

$$f_L = \frac{f_s}{N \cdot \beta_{\max}}. \quad (8)$$

З урахуванням (7) і (8) отримаємо

$$k_r = \frac{N \cdot \beta_{\max}}{k_B}. \quad (9)$$

Нехай частотний діапазон ширококутового сигналу розділено на m перекривних піддіапазонів з коефіцієнтом перекриття $k_i = \frac{f_{H_i}}{f_{L_i}}$. Тоді для i -піддіапазону маємо абсолютне розділення за частотою

$$\Delta f_i = \frac{f_{S_i}}{M_i} = f_{L_i} \cdot \beta_{\max_i}. \quad (10)$$

З виразу (10) видно, що при незмінному значенні β_{\max_i} зменшення f_{L_i} призводить до необхідності зниження частоти дискретизації f_{S_i} або пропорційному збільшенню обсягу M_i . При переході до наступного піддіапазону згідно з (10) маємо: $\Delta f_{i+1} = f_{L_{(i+1)}} \cdot \beta_{\max_{(i+1)}}$.

Звідси отримаємо

$$\frac{\Delta f_{i+1}}{\Delta f_i} = \frac{f_{L_{(i+1)}}}{f_{L_i}} \cdot \frac{\beta_{\max_{(i+1)}}}{\beta_{\max_i}}. \quad (11)$$

Якщо окремі піддіапазони не перекриваються, то $f_{L_{(i+1)}} = f_{H_i}$. Тоді з виразу (11) можна отримати співвідношення між частотами дискретизації сусідніх піддіапазонів:

$$\frac{f_{S_{(i+1)}}}{f_{S_i}} = k_i \frac{\beta_{\max_{(i+1)}}}{\beta_{\max_i}} \cdot \frac{M_{i+1}}{M_i} \quad (12)$$

Співвідношення (12) дає змогу оцінити для кожної підпоследовності, отриманої з масиву вибірок досліджуваного ширококутового сигналу, основні параметри структури ШПФ. Таким чином, можна сформулювати основні етапи реалізації цифрового методу спектрального аналізу ширококутових сигналів.

1. Задається значення загального коефіцієнта перекриття за частотою k_f і виконується розділення початкового діапазону частот на m піддіапазонів. При накладанні відповідних спектральних зон

$$k_f = \prod_{i=1}^m k_{f_i}.$$

2. Визначається довжина оброблюваної підпоследовності з урахуванням максимального значення коефіцієнта відносного розділення за частотою β_{\max_i} та відносної ширини частотної смуги ФНЧ k_{B_i}

$$M_i = \frac{k_{B_i} \cdot k_{f_i}}{\beta_{\max_i}}.$$

3. За відомими значеннями k_{B_n} і f_H визначається частота дискретизації для високочастотного діапазону досліджуваного сигналу

$$f_{S_m} = k_{B_n} \cdot f_H.$$

4. Зі співвідношення (12) знаходиться частота дискретизації для i -го піддіапазону

$$f_{S_i} = \frac{f_{S_{(i+1)}} \cdot \beta_{\max_i} \cdot M_i}{k_{f_i} \cdot \beta_{\max_{(i+1)}} \cdot M_{i+1}}.$$

5. Для кожної з m підпоследовностей виконується ШПФ згідно з отриманими параметрами оброблення та здійснюється спектральний аналіз досліджуваного ширококутового сигналу.

Аналіз ефективності цифрового методу спектрального аналізу ширококутових сигналів

Критерієм ефективності запропонованого методу є продуктивність цифрового оброблення сигналів. Продуктивність методу можна оцінювати за числом «довгих» операцій множення при його реалізації. Але узагальненням цього критерію є коефіцієнт продуктивності, який демонструє вигравш у кількості необхідних операцій при застосуванні запропонованого у роботі методу відносно методу безпосередньої реалізації ШПФ [8]

$$G = \frac{C_{FFT}}{C_{DSP}}, \quad (13)$$

де C_{FFT} – кількість операцій множення при безпосередньому виконанні ШПФ усього масиву відліків сигналу;

C_{DSP} – кількість операцій множення при адаптивному обробленні підпоследовностей, утворених з масиву відліків досліджуваного сигналу.

Реалізація алгоритму ШПФ вимагає $2N \log_2 N$ операцій множення [1]. Застосування ШПФ для окремих m підпоследовностей обсягом M вимагає $2m \cdot M \log_2 M$ операцій множення. Звідси коефіцієнт продуктивності запропонованого методу

$$G = \frac{N}{m \cdot M} \log_M N. \quad (14)$$

На рис. 1 представлено залежність коефіцієнта продуктивності від обсягу цифрової реалізації досліджуваного сигналу для різної довжини оброблюваних підпоследовностей.

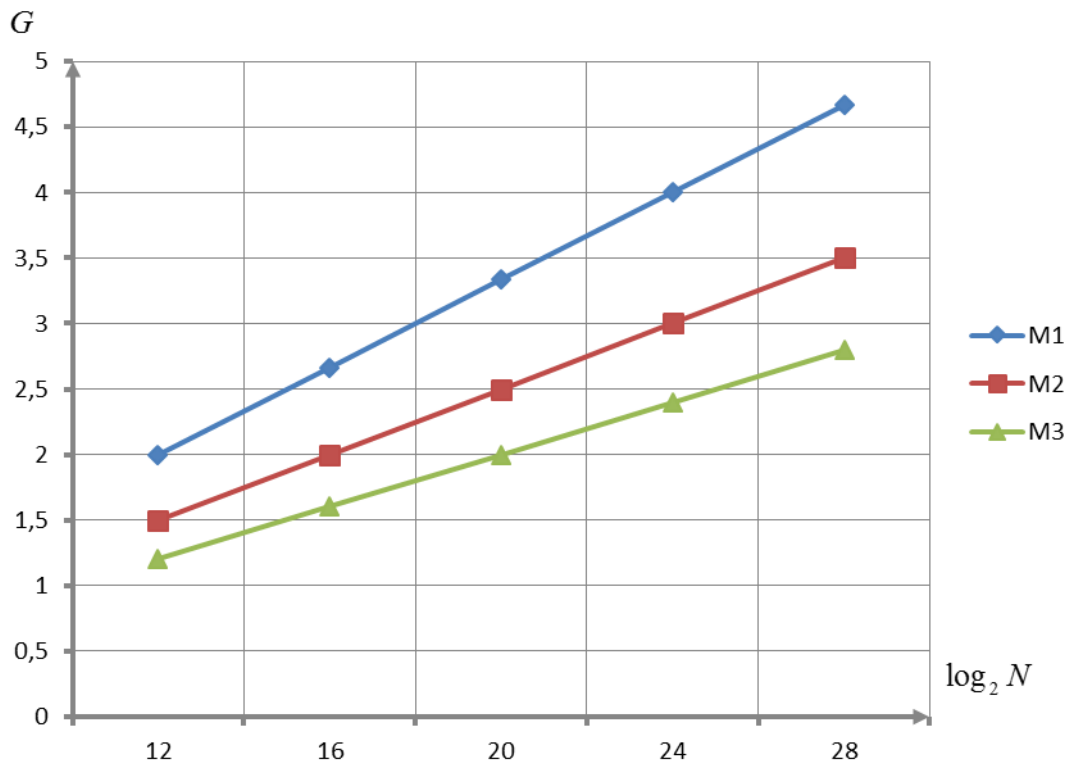


Рис. 1. Залежність коефіцієнтів продуктивності від обсягу реалізації сигналу для $M_1 = 64$; $M_2 = 256$; $M_3 = 1024$

Як видно з графіків, продуктивність запропонованого методу підвищується зі збільшенням обсягу вибірки і дорівнює $2,8 \div 4,6$ для обсягу вибірок досліджуваного сигналу $N = 2^{28}$. При зменшенні довжини аналізованої підпоследовності (збільшення числа оброблюваних підпоследовностей) від $M_3 = 1024$ до $M_1 = 64$ продуктивність зростає, а саме дорівнює $2 \div 3,4$ для обсягу вибірок досліджуваного сигналу $N = 2^{20}$. Таким чином, запропонований метод дає можливість суттєво скоротити час для визначення спектральних складових широкопasmового сигналу та забезпечити режим роботи спектроаналізатора у реальному масштабі часу.

Висновки

У роботі представлено високопродуктивний метод цифрового спектрального аналізу широкопasmових сигналів, який базується на процедурі розділення масиву досліджуваного сигналу на ряд підпоследовностей.

Сформовані підпоследовності обробляються згідно алгоритму ШПФ. У рамках запропонованого методу отримано вирази для розрахунку параметрів структури ШПФ.

Аналіз ефективності запропонованого методу підтвердив, що завдяки розробленому методу вдається підвищити продуктивність цифрового спектрального аналізу широкопasmових сигналів у $2 \div 4,6$ разів залежно від об'єму аналізованої вибірки сигналу та довжини оброблюваної підпоследовності. Максимальний вигравш у продуктивності досягається за умови, коли оброблювана підпоследовність має довжину $M_1 = 64$, а обсяг масиву досліджуваного сигналу $N = 2^{28}$.

Запропонований метод можна використовувати в телекомунікаційних і радіотехнічних системах для спектрального аналізу широкопasmових сигналів у режимі реального масштабу часу.

Література

1. Рабинер Л. Теория и применение цифровой обработки сигналов / Л. Рабинер, Б. Гоулд ; пер. с англ. – М. : Мир, 1978. – 848 с.
2. Бортник Г.Г. Методи та засоби первинного цифрового оброблення радіосигналів / Г.Г. Бортник, М.В. Васильківський, В.М. Кичак. – Вінниця : ВНТУ, 2016. – 168 с.
3. Айфичер Э. Цифровая обработка сигналов / Э. Айфичер, Б. Джервис ; пер. с англ. – М. : Вильямс, 2004. – 992 с.
4. 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.
5. Бортник Г.Г. Цифровий метод спектрального оцінювання випадкових сигналів / Г.Г. Бортник,

М.В. Васильківський, О.В. Стальченко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2014. – № 2. – С. 108–114.

6. Бортник Г.Г. Методи цифрового спектрального аналізу вузькосмугових сигналів / Г.Г. Бортник, О.Г. Бортник, О.В. Стальченко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2016. – № 4. – С. 97–101.

7. Бортник Г.Г. Методи та засоби аналого-цифрового перетворення височастотних сигналів / Г.Г. Бортник, С.Г. Бортник, В.М. Кичак. – Вінниця : ВНТУ, 2014. – 128 с.

8. Бортник Г.Г. Методи та пристрої оцінювання характеристик імпульсно-кодових модуляторів широкосмугових сигналів : монографія / Г. Г. Бортник, В.М. Кичак, Н.О. Пунченко. – Вінниця : ВНТУ, 2014. – 147 с.

References

1. Rabiner L. Teoriya i primeneniye cifrovoj obrabotki signalov / L. Rabiner, B. Gould ; per. s angl. – M. : Mir, 1978. – 848 s.
2. Bortnyk H.H. Metody ta zasoby pervynnoho tsyfrovoho obroblyennia radiosyhnaliv / H.H. Bortnyk, M.V. Vasylykivskiy, V.M. Kychak. – Vinnytsia : VNTU, 2016. – 168 s.
3. Ajficher E. Cifrovaya obrabotka signalov / E. Ajficher, B. Dzhervis ; per. s angl. – M. : Vilyams, 2004. – 992 s.
4. Bortnyk H.H. Metod otsiniuvannya determinovanykh skladovykh fazovoho dryzhannia u tsyfrovyykh systemakh peredavannya / H.H. Bortnyk, M.V. Vasylykivskiy, O.H. Bortnyk // Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh. – 2012. – № 3 – S. 45–48.
5. Bortnyk H.H. Tsyfrovyy metod spektralnoho otsiniuvannya vypadkovykh syhnaliv / H.H. Bortnyk, M.V. Vasylykivskiy, O.V. Stalchenko // Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu. – 2014. – № 2. – S. 108–114.
6. Bortnyk H.H. Metody tsyfrovoho spektralnoho analizu vuzkosmuhovykh syhnaliv / H.H. Bortnyk, O.H. Bortnyk, O.V. Stalchenko // Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu. – 2016. – № 4. – S. 97–101.
7. Bortnyk H.H. Metody ta zasoby analoho-tsyfrovoho peretvorennia vysokochastotnykh syhnaliv / H.H. Bortnyk, S.H. Bortnyk, V.M. Kychak. – Vinnytsia : VNTU, 2014. – 128 s.
8. Bortnyk H.H. Metody ta prystroi otsiniuvannya kharakterystyk impulsno-kodovykh modulatoriv shyrokosmuhovykh syhnaliv : monohrafiya / H. H. Bortnyk, V.M. Kychak, N.O. Puchenko. – Vinnytsia : VNTU, 2014. – 147 s. Рецензія/Peerreview : 03.04.2019

Рецензія/Peer review : 17.5.2019 р.

Надрукована/Printed : 2.6.2019 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Осадчук О.В.

О.В. ОСАДЧУК, В.В. МАРТИНЮК, М.В. ЄВСЄЄВА, О.О. СЕЛЕЦЬКА

Вінницький національний технічний університет

МАГНІТОЧУТЛИВИЙ СЕНСОР НА ОСНОВІ ГЕТЕРОМЕТАЛЕВОЇ КОМПЛЕКСНОЇ СПОЛУКИ

Синтезовано матеріал μ -метоксо(купрум(II), бісмут(III)) ацетилацетонат, такого складу: $Cu_3Bi(AA)_4(OCH_3)_5$, де $HAA = H_3C-C(O)-CH_2-C(O)-CH_3$, проведено експериментальні вимірювання та теоретичні розрахунки основних фізичних параметрів даного матеріалу. Доведено, що даний матеріал є напівпровідником, причому з носіями заряду обох знаків. Отримано залежності концентрації носіїв заряду та сталої Холла від температури. В діапазоні температур від $50^\circ C$ до $220^\circ C$ концентрація носіїв заряду зростає від $8,21 \cdot 10^{23} m^{-3}$ до $4,36 \cdot 10^{35} m^{-3}$, а стала Холла зменшується від $8,9 \cdot 10^{-6} m^3 \cdot Кл^{-1}$ до $1,6 \cdot 10^{-17} m^3 \cdot Кл^{-1}$. Отримано залежності напруги Холла та напруженості електричного поля, всередині пластини розмірами $0,5 \times 0,5 \times 0,15$ мм, від індукції магнітного поля.

Ключові слова: індукція, магнітне поле, концентрація, напівпровідник, гетерометалеві комплексні сполуки.

O.V. OSADCHUK, V.V. MARTINYUK, M.V. EVSEEVA, O.O. SELETSKA

Vinnitsia National Technical University

MAGNETICALLY SENSITIVE SENSOR BASED ON HETEROMETAL COMPLEX COMPOUND

The synthesis of the material μ -methoxy (cupram(II), bismuth(III)) acetylacetonate, composition $Cu_3Bi(AA)_4(OCH_3)_5$, where $HAA = H_3C-C(O)-CH_2-C(O)-CH_3$, experimental measurements and theoretical calculations of the basic physical parameters of this material are carried out. It is proved that this material is a semiconductor, and with the carriers of the charge of both signs. The dependences of the concentration of charge carriers and the constant Hall on temperature are obtained. In the temperature range from $50^\circ C$ to $220^\circ C$, the concentration of charge carriers increases from $8,21 \cdot 10^{23} m^{-3}$ to $4,36 \cdot 10^{35} m^{-3}$, and the Hall's value decreases from $8,9 \cdot 10^{-6} m^3 \cdot Кл^{-1}$ to $1,6 \cdot 10^{-17} m^3 \cdot Кл^{-1}$. The dependences of the Hall voltage and the intensity of the electric field, in the middle of the plate $0,5 \times 0,5 \times 0,15$ mm, on the induction of the magnetic field were obtained.

Key words: induction, magnetic field, concentration, semiconductor, heterometal coordination compounds.

Вступ

Вимірювання параметрів магнітного поля є актуальною науково-технічною задачею. На сьогоднішній день промисловістю серійно виготовляються велике розмаїття первинних перетворювачів магнітного поля (сенсорів). Вони відрізняються як за принципом дії, так і за робочими параметрами [1–3].

Проблема створення нових матеріалів зі спеціальними електрофізичними властивостями, для виготовлення сенсорів магнітного поля, існує досить давно. З цієї точки зору особливий інтерес викликають матеріали, створені на основі комплексних сполук, які, з одного боку, володіють значно більшою розмаїтістю структурних і фізико-хімічних властивостей в порівнянні з традиційними неорганічними напівпровідниками і металами, а з іншого – з можливістю їх хімічного модифікування. Тут слід особливо виділити важливий спосіб модифікування комплексних сполук, пов'язаний зі створенням композиційних матеріалів на їх основі, що дозволяє плавно і в потрібному напрямку змінювати механічні та електрофізичні характеристики цих речовин.

Створення нових електропровідних матеріалів дозволяє реалізувати нові фізичні принципи, що, в свою чергу, має підвищити якість, надійність, ефективність і значно знизити матеріаломісткість багатьох виробів.

Теоретичні та експериментальні дослідження

Метою дослідження є розробка нового магніточутливого елемента на основі синтезованого напівпровідникового матеріалу.

З літератури [4–6] відомо, що гетерометалеві комплексні сполуки володіють напівпровідниковим типом провідності, інтервал робочих температур яких залежить від природи центральних атомів, місткових лігандів, стереохімії метал-лігандного оточення, і можуть бути використані як напівпровідниковий матеріал для виготовлення терморезисторів.

З метою пошуку нових гетерометалевих комплексних сполук, які володіють напівпровідниковими властивостями була розроблена методика синтезу гетерометалевого μ -метоксо (купрум (II), бісмут (III)) ацетилацетонату (I), такого складу: $Cu_3Bi(AA)_4(OCH_3)_5$, де $HAA = H_3C-C(O)-CH_2-C(O)-CH_3$.

Гетерометалеву комплексну сполуку (I) отримано в конічній колбі з оборотним водяним холодильником за такою методикою: до суміші 4,05 г (30 ммоль) безводного купрум (II) хлориду і 3,16 г (10 ммоль) бісмут (III) хлориду додавали 120 мл абсолютного метилового спирту, який містив 2,04 мл (40 ммоль) ацетилацетону. При безперервному перемішуванні нагрівали на водяній бані ($\sim 50^\circ C$) до розчинення вихідних речовин і після цього в реакційну суміш вводили невеликими порціями піперидин до $pH = 8$. Далі реакційну масу продовжували нагрівати на водяній бані ($\sim 50^\circ C$) при безперервному перемішуванні впродовж двох годин. Після охолодження утворювався однорідний дрібнокристалічний осад блакитного кольору, який фільтрували на скляному фільтрі, промивали невеликою кількістю абсолютного метанолу, діетиловим етером і висушували у вакуум-ексикаторі над силікагелем. Практичний вихід дорівнює 7,79 г, що складає 82% від теоретичного. Виділена комплексна сполука (I) являє собою

дрібнокристалічний порошок, який розчинний в суміші диметилформаміду з хлороформом (1:1), важко розчинний в спиртах, етері, краще розчиняється в диметилсульфоксиді, диметилформаміді, у воді руйнується.

Склад, будова та фізико-хімічні властивості синтезованого гетерометалевого μ -метоксо(купрум(II), бісмут(III)) ацетилацетонату доведено на основі даних елементного, рентгенофазового аналізів, магнетохімічного, ІЧ-спектроскопічного і термогравіметричного досліджень [7]. Для виділеної комплексної сполуки (I) на основі проведених досліджень встановлений склад та запропоновано таку схему розміщення хімічних зв'язків (рис. 1) [7]:

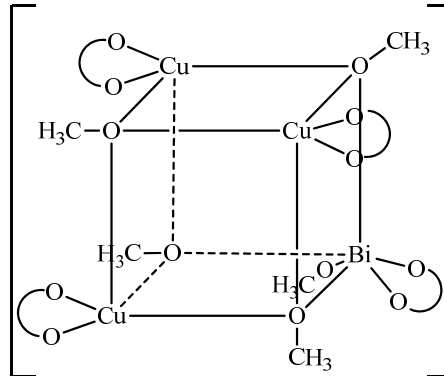


Рис. 1. Схема розміщення хімічних зв'язків в μ -метоксо(купрум (II), бісмут (III)) ацетилацетонаті

Для виділеної комплексної сполуки $\text{Cu}_3\text{Bi}(\text{AA})_4(\text{OCH}_3)_5$ (I) розраховано молярна маса, яка дорівнює 950,5 г/моль та кількість валентних електронів в одній молекулі – 229.

Для проведення експериментальних досліджень використовували циліндричний зразок масою 0,1 г та об'ємом $17,67 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3$, який виготовляли з комплексної сполуки (I) методом пресування. Виходячи з цих даних за формулою (1) було розраховано густину речовини:

$$\rho = m / v = 5,659 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3, \quad (1)$$

де ρ – густина речовини; V – об'єм експериментального зразка; m – маса експериментального зразка.

Масу однієї молекули досліджуваної сполуки (I) розраховували за формулою (2):

$$m_0 = M / N_A = 157,837 \cdot 10^{-20} \text{ кг}, \quad (2)$$

де m_0 – маса однієї молекули сполуки (I); M – молярна маса сполуки (I); N_A – число Авогадро .

Загальну кількість молекул в об'ємі досліджуваного циліндричного зразка, заповненого сполукою (I) розраховували за формулою (3):

$$N_{\text{мол}} = m / m_0 = 6,335 \cdot 10^{13} \text{ молек.}, \quad (3)$$

де $N_{\text{мол}}$ – загальна кількість молекул в об'ємі досліджуваного циліндричного зразка; m – маса експериментального зразка; m_0 – маса однієї молекули сполуки (I).

Загальну кількість валентних електронів:

$$N = 229 \cdot N_{\text{мол}} = 1450,715 \cdot 10^{13}. \quad (4)$$

Що дало змогу розрахувати концентрацію носіїв заряду при температурі 50°C:

$$n = N / V = 82,1 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}. \quad (5)$$

Дослідження електропровідних властивостей μ -метоксо(купрум (II), бісмут (III)) ацетилацетонату в спресованому вигляді в інтервалі температур 50 – 120°C показало, що при підвищенні температури його питомий опір різко зменшується від $8 \cdot 10^9$ до $7 \cdot 10^3$ Ом·см, що є типовим для напівпровідникових матеріалів. Виходячи з експериментальних вимірювань було розраховано питому провідність матеріалу для цих температур. Для 50°C ($T_1 = 323 \text{ К}$) $\sigma_1 = 1,25 \cdot 10^{-8} (\text{Ом}\cdot\text{м})^{-1}$, а для 120°C ($T_2 = 393 \text{ К}$) $\sigma_2 = 1,4 \cdot 10^{-2} (\text{Ом}\cdot\text{м})^{-1}$. На основі цих даних була визначена ширина забороненої зони

$$\Delta E = \frac{k \ln \frac{\sigma_1}{\sigma_2}}{\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)} = 3,49 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 2,18 \text{ eВ}, \quad (6)$$

де k – стала Больцмана; σ – питома провідність матеріалу при різних температурах; T – абсолютна температура.

Розрахунки підтверджують, що даний матеріал є дійсно напівпровідником, причому з носіями струму обох знаків.

Знаючи ширину забороненої зони напівпровідника та використавши формулу залежності концентрації носіїв заряду від температури, отримали графік, який в логарифмічному вигляді подано на рис. 2.

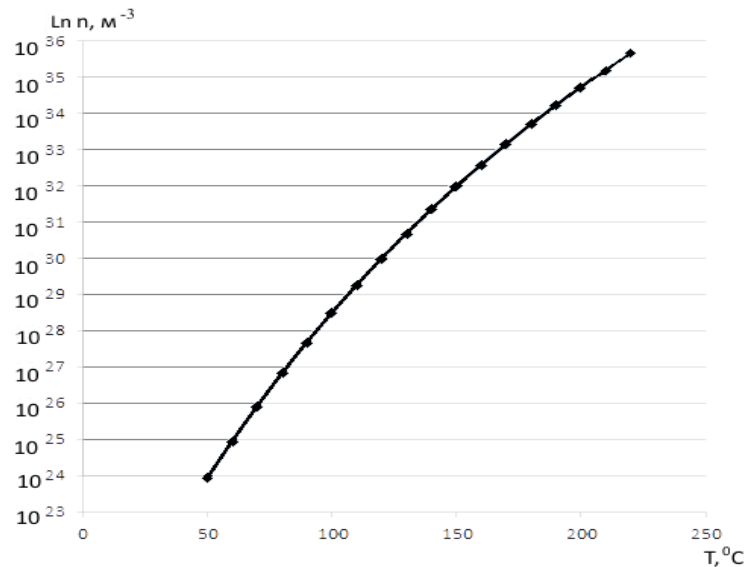


Рис. 2. Логарифмічна залежність концентрації носіїв заряду від температури

Як видно з рис. 2 концентрація носіїв заряду на температурному діапазоні в 170 °С зростає від $8,21 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$ при 50°С до $4,36 \cdot 10^{35} \text{ м}^{-3}$ при 220°С, тобто на 11 порядків.

Розрахунок сталої Холла при 50 °С показує такі результати:

$$R_H = 1/nq = 7,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 \times \text{Кл}^{-1}, \quad (7)$$

де n – концентрація носіїв заряду; q – заряд електрона.

Обчислення квантової сталої Холла проведено за формулою (8):

$$R_{кв\ H} = -3\pi/8nq = -8,949 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 \times \text{Кл}^{-1}. \quad (8)$$

При використанні формули (8) та рівняння залежності концентрації носіїв заряду від температури, отримано формулу (9), яка показує залежність сталої Холла від температури:

$$R_{кв\ H} = -\frac{3\pi}{8qn_0} \cdot e^{\frac{\Delta E}{kT}}. \quad (9)$$

За даною формулою (9) побудовано логарифмічну залежність квантової сталої Холла від температури, яку надано на рис. 3

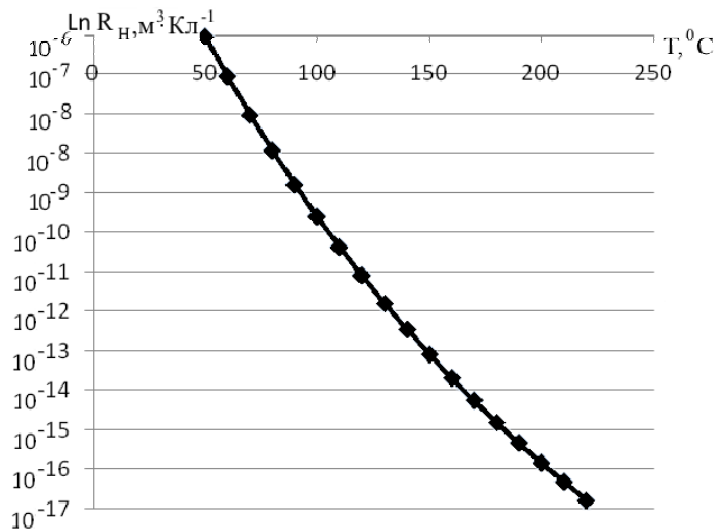


Рис. 3. Логарифмічна залежність квантової сталої Холла від температури

Як видно з рис. 3 величина квантової сталої Холла для такого матеріалу при збільшенні температури від 50 до 220 °С зменшується від $8,9 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 \cdot \text{Кл}^{-1}$ до $1,6 \cdot 10^{-17} \text{ м}^3 \cdot \text{Кл}^{-1}$.

Для знаходження рухливості носіїв заряду з експериментальних даних питомого опору, при 50°С, $\rho = 8 \cdot 10^9 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, була розрахована питома провідність $\sigma = 1,25 \cdot 10^{-8} \text{ сім/м}$.

$$\mu_n = R_H \cdot \sigma. \quad (10)$$

Визначимо рухливість носіїв заряду для квантового випадку:

$$\mu_n = R_{кв\ H} \cdot \sigma = 11,186 \cdot 10^{-14} \text{ м}^3 \times (\text{В} \times \text{с})^{-1}. \quad (11)$$

В ході підстановки залежностей сталої Холла від температури та питомої провідності від температури було визначено, що рухливість носіїв заряду є величина стала $\mu = 1,12 \times 10^{-13} \text{ м}^3/(\text{В} \cdot \text{с})$ і не залежить від температури.

Для розрахунку Холлівської напруженості електричного поля всередині напівпровідника та напруги, що виникає під дією магнітного поля, візьмемо пластинку з розмірами $0,5 \times 0,5 \times 0,15$ мм. Логарифмічна залежність Холлівської напруженості електричного поля всередині напівпровідника від індукції магнітного поля надано на рис. 4.

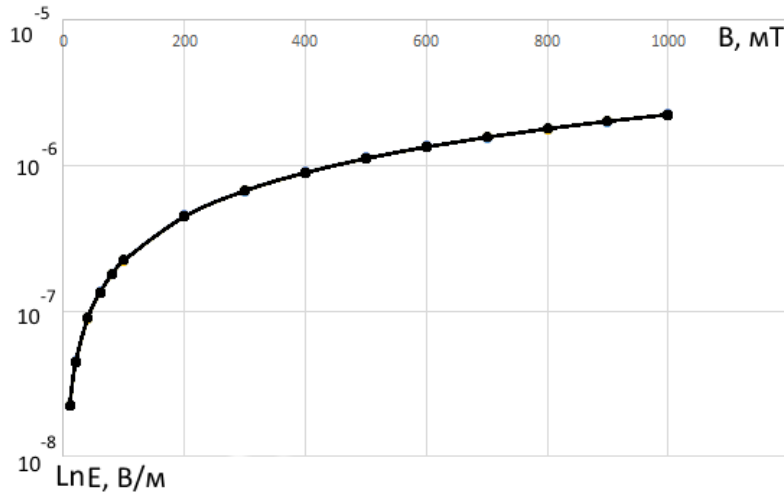


Рис. 4. Логарифмічна залежність напруженості електричного поля всередині напівпровідника від індукції магнітного поля

Як видно з графіка в діапазоні від 0 до 100 мТ напруженість збільшується в 10 разів, а в діапазоні від 400 до 1000 мТ графік набуває лінійного характеру і напруженість майже не змінюється.

Аналогічна залежність спостерігається і для Холлівської напруги. Логарифмічну залежність Холлівської напруги від індукції магнітного поля надано на рис. 5.

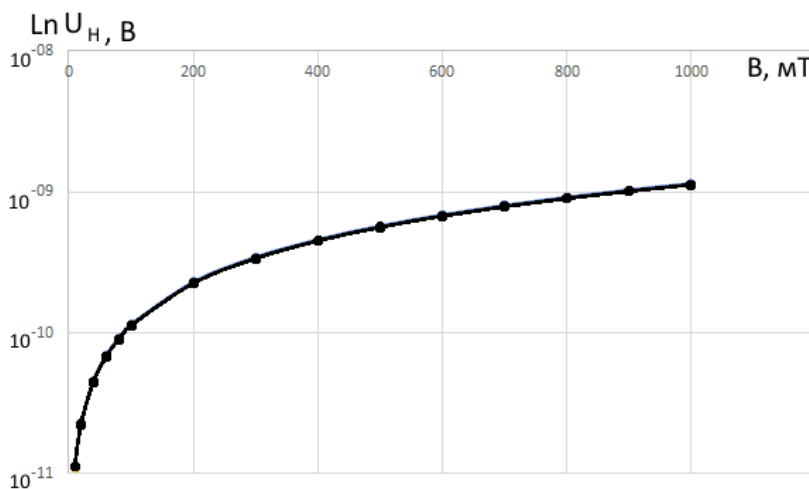


Рис. 5. Логарифмічна залежність Холлівської напруги від індукції магнітного поля

З графіка видно, що в діапазоні від 0 до 200 мТ Холлівська напруга зростає від $1,12 \cdot 10^{-11}$ до $2,24 \cdot 10^{-10}$ В, від 200 до 600 мТ – від $2,24 \cdot 10^{-10}$ В до $6,73 \cdot 10^{-10}$ В і від 600 мТ до 1000 мТ – Холлівська напруга зростає від $6,73 \cdot 10^{-10}$ до $1,12 \cdot 10^{-9}$ В.

Висновки

Розроблено новий магніточутливий елемент на основі синтезованого напівпровідникового матеріалу. Дослідження електропровідних властивостей μ -метоксо (купрум (II), бісмут (III)) ацетилацетонату в спресованому вигляді в інтервалі температур 50 – 120°C показало, що при підвищенні температури його питомий опір різко зменшується від $8 \cdot 10^9$ до $7 \cdot 10^3$ Ом·см, що є типовим для напівпровідникових матеріалів. Інтервал робочих температур складає від +50 до +220°C, причому розкладання хімічної сполуки відбувається з 260°C, концентрація носіїв заряду зростає від $8,21 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$ при 50°C до $4,36 \cdot 10^{35} \text{ м}^{-3}$ при 220°C, при цьому стала Холла при збільшенні температури від 50 до 220 °C зменшується від $8,9 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 \cdot \text{Кл}^{-1}$ до $1,6 \cdot 10^{-17} \text{ м}^3 \cdot \text{Кл}^{-1}$, напруга Холла в діапазоні магнітного поля від 0 до 1000 мТ змінюється від $1,12 \cdot 10^{-11}$ до $1,12 \cdot 10^{-9}$ В.

Література

1. Осадчук В.С. Сенсори тиску і магнітного поля / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук. – Вінниця : «Універсум-Вінниця», 2005. – 207 с.
2. Осадчук О. В. Перетворювач магнітного поля на основі магніточутливого діода та активно-індуктивного елемента / [О. В. Осадчук, В. В. Мартинюк, О. М. Жагловська, Л. В. Крилик] // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2017. – № 1. – С. 93–98.
3. Осадчук В.С. Сенсори магнітного поля на основі польових транзисторів / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, В. В. Мартинюк // *Materialy VII Miedzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji «Naukowa mysl informacyjnej powieki – 2011»* – Sp. z.o.o. «Nauka i studia». – 2011. – S. 38–42.
4. Синтез і властивості гетерометалевих координаційних сполук купруму(II), ніколу(II) або кобальту(II) і лужноземельних елементів з N, N'-біс(саліциліден)семикарбазидом / [А. П. Ранський, М. В. Євсєєва, Т. І. Панченко, О. А. Гордієнко] // *Укр. хім. журн.* – 2013. – Т. 79, № 2. – С. 74–79.
5. Panchenko T. Copper(II) and nickel(II) with N,N'-bis(salicylidene) thiosemicarbazide heterometal complex compounds / T. Panchenko, M. Evseeva, A. Ranskiy // *J. Chem. & Chem. Technology.* – 2014. – V. 8, № 3. – P. 243–248.
6. Гетерометаллические (лантаноид или иттрий, р- или d-элемент) содержащие N, N'-этилен-бис-салicyлиденимины / Н. М. Самусь, И. В. Хорошун, И. В. Синица, М. В. Гандзий // *Коорд. химия.* – 1993. – Т. 19, № 9. – С. 729–732.
7. Самусь Н. М. Гетерометаллические μ -алкокс(медь, висмут) содержащие ацетилацетонаты / Н.М. Самусь, В. И. Цапков, М. В. Гандзий // *Журнал общей химии.* – 1993. – Т. 63, № 1. – С. 177–182.
8. Осадчук В. С. Мікроелектронний перетворювач магнітної індукції з частотним виходом / В.С. Осадчук, О. В. Осадчук, В. В. Мартинюк, О. П. Стівбчата // *Вісник Вінницького політехнічного інституту.* – 2011. – № 5. – С. 157–163.

References

1. Osadchuk V.S. Sensory tysku i mahnitnoho polia / V. S. Osadchuk, O. V. Osadchuk. – Vinnytsia : «Universum-Vinnytsia», 2005. – 207 s.
2. Osadchuk O. V. Peretvoriuvach mahnitnoho polia na osnovi mahnitochutlyvoho dioda ta aktyvno-induktyvnoho elementa / [O.V. Osadchuk, V. V. Martyniuk, O. M. Zhahlovska, L. V. Krylyk] // *Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh.* – 2017. – № 1. – S. 93–98.
3. Osadchuk V.S. Sensory mahnitnoho polia na osnovi polovykh tranzystoriv / V. S. Osadchuk, O. V. Osadchuk, V. V. Martyniuk // *Materialy VII Miedzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji «Naukowa mysl informacyjnej powieki – 2011»* – Sp. z.o.o. «Nauka i studia». – 2011. – S. 38–42.
4. Syntez i vlastyvosti heterometalevykh koordynatsiinykh spoluk kuprumu(II), nikolu(II) abo kobaltu(II) i luzhnozemelnykh elementiv z N, N-bis(salitsyliden)semykarbazydom / [A. P. Ranskiy, M. V. Yevsieieva, T. I. Panchenko, O. A. Hordiienko] // *Ukr. khim. zhurn.* – 2013. – Т. 79, № 2. – S. 74–79.
5. Panchenko T. Copper(II) and nickel(II) with N,N-bis(salicylidene) thiosemicarbazide heterometal complex compounds / T. Panchenko, M. Evseeva, A. Ranskiy // *J. Chem. & Chem. Technology.* – 2014. – V. 8, № 3. – R. 243–248.
6. Geterometallicheskie (lantanoid ili ittrij, r- ili d-element) sodержashie N, N'-etilen-bis-salicylideniminy / N. M. Samus, I.V. Horoshun, I. V. Sinica, M. V. Gandzij // *Koord. himiya.* – 1993. – Т. 19, № 9. – S. 729–732.
7. Samus N. M. Geterometallicheskie μ -alkokso(med, vismut) sodержashie acetilacetonaty / N. M. Samus, V. I. Capkov, M.V. Gandzij // *Zhurnal obshej himii.* – 1993. – Т. 63, № 1. – S. 177–182.
8. Osadchuk V. S. Mikroelektronnyi peretvoriuvach mahnitnoi induktsii z chastotnym vykhodom / V. S. Osadchuk, O. V. Osadchuk, V. V. Martyniuk, O. P. Stovbchata // *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu.* – 2011. – № 5. – S. 157–163.

Рецензія/Peer review : 22.3.2019 р.

Надрукована/Printed : 2.6.2019 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Петрук В. Г.

А.Д. СЛОБОДЯНИК, Л.Г. КОВАЛЬ, С.М. ЗЛЕПКО, А.Ю. КЛАПОУЩАК
Вінницький національний технічний університет

ЗАКОНИ ТЕПЛООВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ В СПЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧАХ

Метою статті є теоретична модель спектрогенераторів, що працюють в умовах самозбудження самої системи. У роботі було проведено теоретичні дослідження спектроенергетичних перетворювачів. Здійснено системний аналіз квантової теорії випромінювання та його взаємодії з найбільш придатними середовищами.

Ключові слова: оптичні частотні перетворювачі, спектротрансформатори, спектральна випромінювальна здатність, формула Планка.

A.D. SLOBODYANYK, L.G. KOVAL, S.M. ZLEPKO, A.Y. KLAPUSHCHAK
Vinnytsia National Technical University

HEAT DAMAGE LAWS IN SPECTROENERGETIC CONVERTERS

At the present stage of the development of the theory of radiation, the possibility of using successive interactions occurring in a medium with quadratic nonlinearity in the field of a general pumping wave for the development of such converters is discussed. The article proposes a theoretical model of such spectrogenerators that operate under self-excitation conditions of the system itself. The developed model is based on the quantum laws of radiation and the interaction of radiation with matter. The basis of this theory is the Schrödinger equation and its separate solutions are presented. The proposed atomic system consists of a large number of atoms, which, in addition to other energy levels, have two energy levels with energies E_1 and E_2 with corresponding densities of population N_1 and N_2 . The proposed method of transforming the lengths of light waves on the basis of the information-energy transformation of the light spectrum includes an effective working environment of the resonance optical pump of alkali metal vapour, which allows the population of the upper atomic levels to occur and predetermines the inverse population of relatively lower energy levels. This creates the possibility of spectral transformation of waves of a wide cosmic range in a predetermined interval of wavelengths below the placed energy levels. Also in the article theoretical studies of spectroenergetic converters were conducted. The system analysis of the quantum theory of radiation and its interaction with the most suitable environments is carried out. The obtained laws are suitable for solving the problem of energy transformation of various ranges of the energy spectrum.

Keywords: optical frequency converters, spectrottransformers, spectral emitting power, Planck's formula.

Вступ

Проблема створення частотних перетворювачів різних оптичних діапазонів розкривається в класичних роботах лінійної оптики [1, 2]. На сучасному етапі розвитку теорії випромінювання обговорюється можливість використання послідовних взаємодій, що відбуваються в середовищі з квадратичною нелінійністю в полі загальної хвилі накачки для розробки таких перетворювачів [3, 4]. Про використання явища вимушеного випромінювання інвертованої атомної системи для підсилення або перетворення оптичного сигналу відомо з праць Шавлова і Таунса. Практично ця ідея реалізована в ході створення імпульсного рубінового лазера, лазера неперервної дії – гелій-неоновий газовий лазер. Пізніше була отримана неперервна генерація в твердотільних системах на напівпровідниках.

Постановка проблеми

В роботі ставиться проблема дослідження спектроенергетичних перетворювачів оптичного і близького до нього діапазону. Пропонується теоретична модель таких спектрогенераторів, що працюють в умовах самозбудження самої системи. Розроблена модель базується на квантових законах випромінювання та взаємодії випромінювання з речовиною. В основі цієї теорії є рівняння Шредінгера та представлені його окремі розв'язки.

Основний текст

Запропонована атомна система складається з великої кількості атомів, які, крім інших енергетичних рівнів, мають два енергетичні рівні з енергіями E_1 та E_2 з відповідними густинами заселення N_1 та N_2 .

Розглянемо взаємодію окремого атома з полем випромінювання абсолютно чорного тіла при температурі T .

Атоми, що мають енергію E_2 ($E_2 > E_1$) знаходяться в збудженому стані. Виділимо деяку ділянку, яка бере участь у рівноважному випромінюванні, і застосуємо до неї закон розподілу атомів за енергіями Больцмана. Згідно із законом, числа атомів, що мають енергію E_1 і E_2 , відповідно дорівнюють

$$N_1 = N_0 e^{-\frac{E_1}{kT}}; \quad N_2 = N_0 e^{-\frac{E_2}{kT}}, \quad (1)$$

звідки

$$\frac{N_1}{N_2} = e^{\frac{E_2 - E_1}{kT}} = e^{\frac{h\nu}{kT}}. \quad (2)$$

У стані рівноважного випромінювання число атомів, що випромінюють світло за певний період часу, дорівнює числу атомів, що поглинають світло за цей самий час.

Розглянемо кількість актів випромінювання за одиницю часу. Кількість збуджених атомів N_2 . Їх перехід на нижчий енергетичний рівень, що супроводжується випромінюванням фотонів може бути самовільним або відбуватися під впливом падаючих електромагнітних хвиль. Кількість спонтанних випромінювань збуджених атомів за одиницю часу пропорційна числу атомів N_2 і відповідно дорівнює $n_1 = AN_2$, де A – коефіцієнт пропорційності, що показує відносну кількість актів спонтанних випромінювань з усього числа атомів N_2 . Кількість актів випромінювання збуджених атомів, зумовлених падаючими хвилями, пропорційна також числу збуджених атомів N_2 та густині енергії падаючих електромагнітних хвиль $w(\nu, T)$. Так як $w(\nu, T)$ пропорційна до випромінювальної здатності абсолютно чорного тіла $\varepsilon(\nu, T)$, то кількість вимушених випромінювань в цьому випадку буде $n_2 = B_{21}N_2\varepsilon(\nu, T)$, де B_{21} – відповідний коефіцієнт імовірності переходу атомів із вищого енергетичного рівня E_2 на нижчий рівень E_1 зумовленого падаючими хвилями.

Кількість усіх випромінювань збуджених атомів, тобто загальне число фотонів, що випромінюються за одиницю часу, дорівнює

$$n = n_1 + n_2 = AN_2 + B_{21}N_2\varepsilon(\nu, T). \quad (3)$$

Кількість актів поглинання фотонів атомами N_1 , внаслідок чого вони переходять, пропорційна кількості самих атомів і густині енергії падаючих променів, тобто

$$n'_1 = B_{12}N_1\varepsilon(\nu, T), \quad (4)$$

де B_{12} – відповідний коефіцієнт імовірності переходу атомів з рівня E_1 на рівень E_2 .

Для рівноважного випромінювання кількість актів поглинання повинна бути рівна кількості актів випромінювання ($n = n'_1$). Прирівняємо вирази (3) і (4) між собою, дістанемо:

$$AN_2 + B_{21}N_2\varepsilon(\nu, T) = B_{12}N_1\varepsilon(\nu, T). \quad (5)$$

Розв'яжемо рівняння (5) відносно випромінювальної здатності абсолютно чорного тіла, дістанемо:

$$\varepsilon(\nu, T) = \frac{AN_2}{B_{12}N_1 - B_{21}N_2} = \frac{AN_2}{\frac{B_{12}}{B_{21}} \frac{N_1}{N_2} - 1} = \frac{AN_2}{\frac{B_{12}}{B_{21}} e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \quad (6)$$

Коефіцієнти A, B_{12}, B_{21} визначаються з граничних умов. При нескінченно високій температурі ($T \rightarrow \infty$) функція $e^{\frac{h\nu}{kT}} \rightarrow 1$. З врахуванням цього формула (6) набуває вигляду

$$\varepsilon(\nu, \infty) = \frac{AN_2}{\frac{B_{12}}{B_{21}} - 1} \quad (7)$$

З функції розподілу випливає, коли $T \rightarrow \infty$, $\varepsilon(\nu, \infty) \rightarrow \infty$. Звідси випливає, що знаменник у виразі (7) прямує до нуля, отже $\frac{B_{12}}{B_{21}} = 1$. Підставимо цей вираз у формулу (6), дістанемо

$$\varepsilon(\nu, T) = \frac{AN}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \quad (8)$$

Для досить малих частот енергія кванта випромінювання дуже мала порівняно з енергією теплового руху ($h\nu \ll kT$), тому можна обмежитися двома першими членами розкладеної в ряд функції $e^{\frac{h\nu}{kT}}$:

$$e^{\frac{h\nu}{kT}} = 1 + \frac{h\nu}{kT} + \dots \approx 1 + \frac{h\nu}{kT}.$$

Отже, формула (8) набуде такого вигляду:

$$\varepsilon(\nu, T) = AN_2 \frac{kT}{h\nu}. \quad (9)$$

В області малих частот ($h\nu \ll kT$) справджується класична формула Релея $\varepsilon(\nu, T) = \frac{2\pi\nu^2 kT}{c^2}$.

Прирівнюючи до формули (9), отримаємо:

$$\varepsilon(\nu, T) = AN_2 \frac{kT}{h\nu} = \frac{2\pi\nu^2 kT}{c^2} \Rightarrow AN_2 = \frac{2\pi h\nu^3}{c^2}. \quad (10)$$

З врахуванням отриманих коефіцієнтів, формула Планка (8) набуде вигляду:

$$\varepsilon(\nu, T) = \frac{2\pi h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1}, \quad (11)$$

де $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – стала Планка;

$k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – стала Больцмана.

Розподіл енергії випромінювання $\varepsilon(\nu, T)$, $\frac{\text{Дж}}{\text{с} \cdot \text{м}^2}$ за частотою ν при різних температурах T представлено на рис. 1.

Для визначення ймовірності переходу W_{21} , індукованого монохроматичними полем визначається загальним виразом:

$$(W_{21}) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{Ac^2 \rho(\nu)}{2\pi h\nu^3} g(\nu - \nu_0) d\nu, \quad (12)$$

де $g(\nu - \nu_0)$ – нормована функція форми лінії з максимумом при ν_0 .

До визнання наявності енергетичних зон у кристалах приводить аналіз розв'язків рівняння Шредінгера для електрона у кристалі. Так, застосування адіабатичного і одноелектронного наближення перетворює рівняння для всього кристала в рівняння для однієї частинки.

Адіабатичне наближення базується на тому, що середня швидкість електронів як легких частинок набагато перевищує швидкість ядер. За час, протягом якого електрони проходять значний шлях, розташування ядер у кристалі практично не змінюється. Тому вважають, що ядра при цьому нерухомі.

Одноелектронне наближення є одним із фундаментальних методів теорії твердого тіла. Воно полягає в тому, що справжнє потенціальне поле, яке визначається миттєвими положеннями всіх електронів і описується потенціальною енергією U_e , замінюється на поле, створене усередненим просторовим зарядом решти електронів $\Omega(r_i)$ та нерухомими іонами кристалічної ґратки $V(r_i)$

$$U_e(r_i) = \Omega(r_i) + V(r_i)$$

Тоді стаціонарне рівняння Шредінгера i -го електрона матиме вигляд

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \phi(r) + [\Omega(r) + V(r)] \phi(r) = E \phi(r). \quad (13)$$

Розв'язок рівняння (13) знаходять так. Обчислюють Ω на основі одноелектронних хвильових функцій нульового наближення, підібраних інтуїтивно. Після цього із системи рівнянь типу (13) визначають хвильові функції в першому наближенні, потім – хвильові функції в другому наближенні і т.д. У теорії твердого тіла поле Ω часто розглядають як постійну величину і вважають, що вона дорівнює нулю. Таким чином, задача про електронні властивості кристала зводиться до задачі про рух одного електрона в періодичному полі кристалічної ґратки.

Розглянемо деякі особливості руху електрона в кристалі на прикладі лінійної моделі кристалічного тіла. Ця модель визначається потенціальною енергією електрона $V(r_i)$. Функція $V(r_i)$ – періодична з періодом a , тобто $V(x+a) = V(x)$.

Для спрощення обмежимося розглядом одновимірного кристала (тобто нескінченного прямолінійного ланцюжка однакових атомів, що знаходяться на постійній відстані a один від одного). Рівняння Шредінгера для стаціонарних станів у цьому випадку має вигляд

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2 \phi}{dx^2} + U(x) \phi = E \phi, \quad (14)$$

або

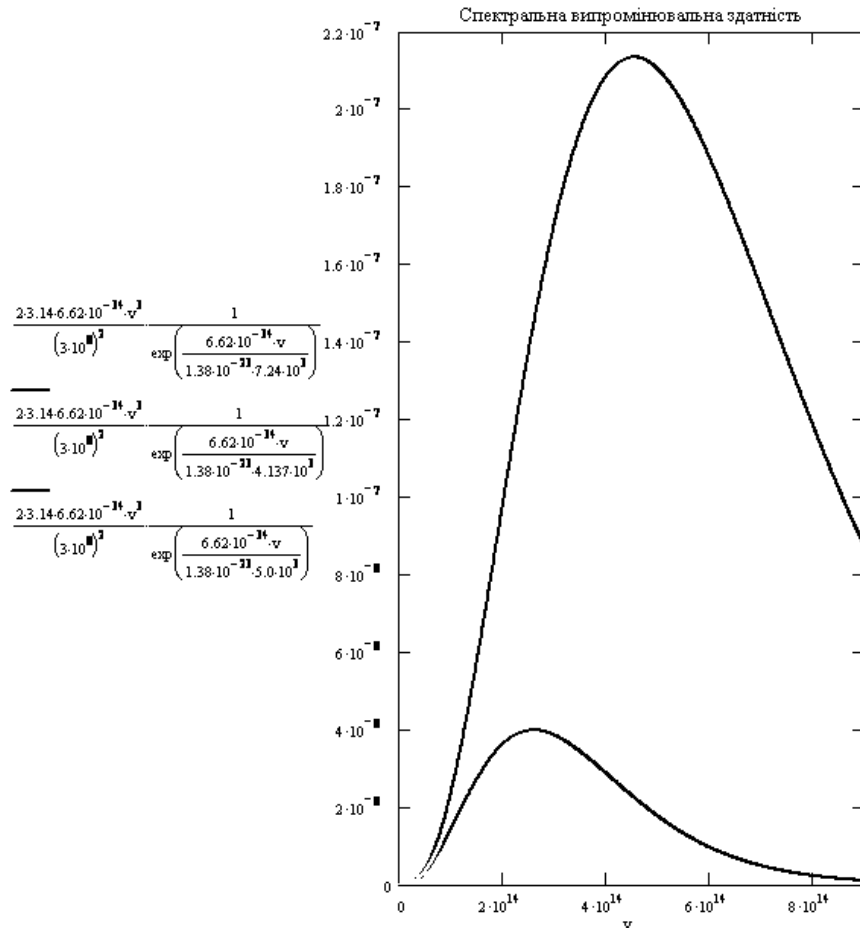
$$\frac{d^2 \phi}{dx^2} + \chi^2(x) \phi = 0, \quad (15)$$

де $\chi^2 = \frac{2m}{\hbar^2} (E - U)$.

Рівняння (15) – лінійне диференціальне рівняння другого порядку зі змінними періодично коефіцієнтами, оскільки у разі відсутності зовнішнього поля $\chi^2(x+a) = \chi^2(x)$ для будь-якого x .

Проведемо дослідження загального вигляду розв'язків цього рівняння, користуючись періодичністю функції $\chi^2(x)$, результатом якої є

$$\frac{d^2 \phi(x+a)}{dx^2} + \chi^2(x+a) \phi(x+a) = \frac{d^2 \phi}{dx^2} + \chi^2(x) \phi(x+a) \quad (16)$$

Рис. 1. Розподіл енергії випромінювання за частотою ν та температурою T

З (16) видно, що якщо функція $\phi(x)$ є розв'язком рівняння Хілла, а функція $\phi(x-a)$ також буде розв'язком того ж рівняння. Якщо $C_1\phi_1(x)$ і $C_2\phi_2(x)$ – будь-яких два довільних лінійно незалежних розв'язки рівняння (15), то його загальний розв'язок можна подати у вигляді

$$\phi(x) = C_1\phi_1(x) + C_2\phi_2(x),$$

де C_1 і C_2 – довільні сталі.

Доведемо, що серед розв'язків рівняння (15) існує такий розв'язок $\Phi(x)$, коли для будь-якого x $\Phi(x+a) = \lambda\Phi(x)$, де λ – стала. Якщо такий розв'язок існує, то його також можна подати у вигляді $\Phi(x) = C_1\phi_1(x) + C_2\phi_2(x)$

Для спрощення розрахунків виберемо лінійно незалежні розв'язки $\phi_1(x)$ і $\phi_2(x)$ так, щоб вони задовольняли умовам

$$\phi_1(0) = 1, \phi_1'(0) = 0$$

$$\phi_2(0) = 0, \phi_2'(0) = 1$$

У такому випадку кажуть, що функції $\phi_1(x)$ і $\phi_2(x)$ утворюють фундаментальну систему розв'язків). Тоді при $x=0$ вимоги $\Phi(x+a) = \lambda\Phi(x)$ і $\Phi'(x+a) = \lambda\Phi'(x)$ запишуться так:

$$C_1\phi_1(x) + C_2\phi_2(x) = \lambda C_1$$

$$C_1\phi_1'(x) + C_2\phi_2'(x) = \lambda C_2$$

або

$$[\phi_1(a) - \lambda]C_1 + \phi_2(a)C_2 = 0$$

$$\phi_1'(a)C_1 + [\phi_2'(a) - \lambda]C_2 = 0$$

Розв'язки цієї системи лінійних однорідних рівнянь (відносно C_1 і C_2) існують за умови

$$\begin{vmatrix} \phi_1(a) - \lambda & \phi_2(a) \\ \phi_1'(a) & \phi_2'(a) - \lambda \end{vmatrix} = 0$$

або

$$\lambda^2 - [\phi_1(a) + \phi_2'(a)]\lambda + [\phi_1(a)\phi_2'(a) - \phi_1'(a)\phi_2(a)] = 0. \tag{17}$$

Шляхом диференціювання з врахуванням рівняння (15) легко переконатися, що

$$\frac{d}{dx} [\phi_1(x)\phi_2'(x) - \phi_1'(x)\phi_2(x)] = 0.$$

Отже, третій доданок (17) являє собою функцію, яка є сталою величиною, її значення для $x = 0$ перетворюється в одиницю. Такого ж значення набирає ця функція і для $x = a$. Позначимо $\phi_1(a) + \phi_2'(a) = 2L$.

Цим самим визначиться не один, а два розв'язки рівняння (15): $\phi_1(x)$ і $\phi_2(x)$, які задовольняють необхідні вимоги. Розв'язки $\phi_1(x)$ і $\phi_2(x)$ лінійно незалежні, і їх зручно для подання загального розв'язку взяти у вигляді

$$\phi = C_1\phi_1(x) + C_2\phi_2(x). \tag{18}$$

Самі розв'язки $\phi_1(x)$ і $\phi_2(x)$ не можуть бути знайдені, якщо функція $\chi^2(x)$ невідома, а параметр E нефіксований. Проте це не перешкоджає оперувати функціями $\phi_1(x)$ і $\phi_2(x)$ для встановлення загальних властивостей розв'язків рівняння (15).

Припустимо спочатку, що стала L за модулем більша від одиниці $|L| > 1$. Тоді корені λ_1 і λ_2 є дійсними і різними. Тому з рівняння $\Phi(x+a) = \lambda\Phi(x)$ випливає, що у випадку, коли $x \rightarrow \infty$, одна з функцій $\phi_1(x)$ або $\phi_2(x)$ необмежено зростає, а коли $x \rightarrow -\infty$, необмежено зростає інша. Внаслідок цього при $|L| > 1$ ні один із розв'язків $\phi_1(x)$ і $\phi_2(x)$ а отже, і довільна лінійна комбінація їх зі сталими коефіцієнтами (18) не може бути хвильовою функцією електрона в кристалі. Це означає, що в кристалі не існує станів з енергією E , для яких $|L| > 1$. Такі енергії утворюють заборонені енергетичні зони.

Якщо ще врахувати часовий множник $e^{-i\omega t}$, то у разі відсутності зовнішніх силових полів можливі повні хвильові функції в кристалі можна подати у вигляді

$$\begin{aligned} \psi_1(x, t) &= P_1(x) e^{-i(\omega t - kx)} \\ \psi_2(x, t) &= P_2(x) e^{-i(\omega t + kx)} \end{aligned} \tag{19}$$

Ці хвилі описують "вільний рух" електрона в кристалі, коли всі діючі на нього сили обмежені взаємодією з іонами кристалічної ґратки та іншими електронами, а зовнішніх силових полів немає. Вони називаються хвилями Блоха. На відміну від плоских хвиль де Бройля, що поширюються у вільному просторі, у хвилях Блоха величини $P_1(x)$ і $P_2(x)$ не сталі, а просторово модульовані, тобто періодично змінюються вздовж ланцюжка з періодом a . Через таку просторову модуляцію при вільному поширенні Ψ -хвиль у кристалі величину $\hbar k$ називають квазіімпульсом електрона, тоді як при русі електрона у вільному просторі така величина є просто імпульсом.

У тривимірних кристалах плоска хвиля Блоха має вигляд, аналогічний (19). Тільки $P(x)$ замінюється на функцію $P(\vec{r})$, яка має ту ж просторову періодичність, що й сама ґратка, а хвильове число k – на хвильовий вектор \vec{k} , якому відповідає квазіімпульс $\hbar \vec{k}$.

Вибором квазіімпульсу визначається з точністю до сталої множника хвильова функція Блоха. Отже, визначається і енергія електрона ϵ , яка входить у стаціонарне рівняння Шредінгера як сталий параметр. Таким чином, у межах кожної зони допустимі значення енергії електрона можуть бути подані як функції квазіімпульсу $E = E(p)$. Звідси отримуємо $\omega = \omega(k)$, оскільки $E = \hbar\omega$. Обидва ці співвідношення називаються законами дисперсії електронних хвиль або електрона в кристалі.

Реалізація можливих спектротрансформаторів представлена на такій блок-схемі, що включає в себе набір вузькочастотних демодуляторів (рис. 2). Випромінювання деякої ширини спектру $\hbar(\omega + \Delta\omega)$ потрапляє на блок I, в якому відбувається аналіз (декодування) виду енергетичного спектру (оптичний, радіочастотний, рентгенівський, γ -випромінювання, космічні промені і т.д.). Вхідними пристроями блоку I є оптичні коліматори, коливальні контури з чутливими антенами, детектори γ -випромінювання. Блок II являє собою демодулюючу систему, в якому відбувається розкладання складного за спектром випромінювання на окремі частоти ω_0 . Тоді моноскладові випромінювання потрапляють на блок приймачів

III. Між демодулюючою системою і блоком приймачів існує зворотній зв'язок. На виході з такої системи отримується сигнал заданої частоти ω_0 , що відповідає енергії $\hbar \omega_0$. Розглянуті модулі I, II, III працюють на відомих фізичних закономірностях та явищах резонансу, інтерференції, дифракції, дисперсії, фотоефекту, ефекту Комптона і т.д. Така система робить селекцію та взаємне перетворення вхідного сигналу за відповідними частотами, тобто за енергією.

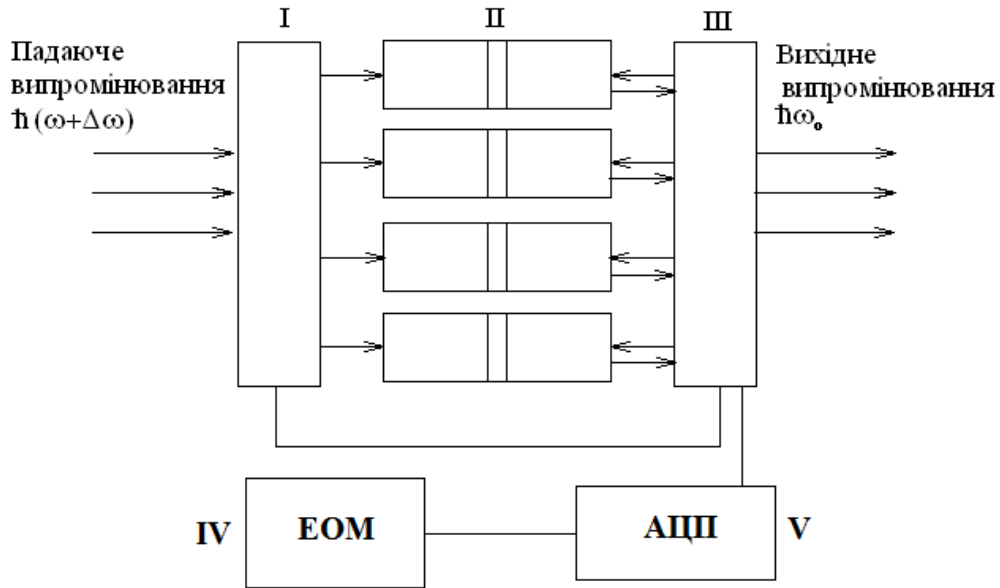


Рис. 2. Блок-схема спектротрансформатора

Система трансформації довжин хвиль, що носить більш універсальний характер функціонує відповідно до закону Бугера-Ламберта-Фабриканта

$$I(x) = I_0 e^{(\alpha - \beta)x}, \tag{20}$$

де $I_0, I(x)$ – інтенсивності відповідно падаючої і хвилі, що пройшла крізь середовище;
 α – коефіцієнт підсилення;
 β – коефіцієнт послаблення середовища;
 x – товщина шару середовища.

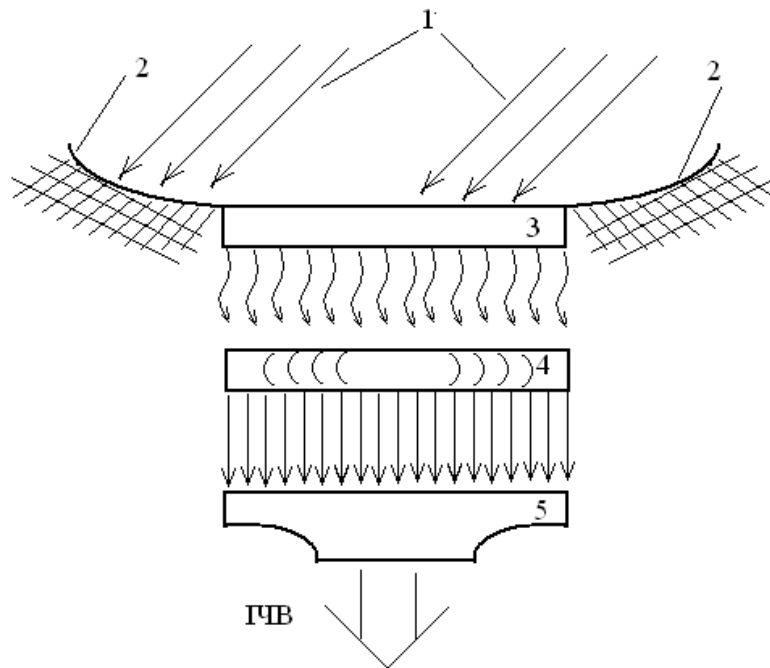


Рис. 3. Схема способу уніфікованої трансформації довжин хвиль

З формули видно, що в оптично активному середовищі ($\alpha > 0$) інтенсивність випромінювання

$I(x)$ значно зростає при збільшенні товщини шару середовища. Така система трансформації спектрального складу випромінювання має ряд переваг (6).

Космічне випромінювання 1 та відбите випромінювання системою дзеркал 2 потрапляє на активний спектральний перетворювач 3 (рис. 3). Тоді перетворений енергетичний спектр у необхідний частотний діапазон потрапляє до підсилювача випромінювання 4 і реєструється приймачем випромінювання 5.

Запропонований спосіб трансформації довжин світлових хвиль на базі інформаційно-енергетичного перетворення світлового спектру містить в собі ефективне робоче середовище резонансної оптичної накачки парів лужних металів, яке дозволяє здійснювати заселення верхніх атомних рівнів та зумовлює інверсне заселення відносно нижче розміщених енергетичних рівнів. Це створює можливість спектральної трансформації хвиль широкого космічного діапазону в наперед заданий інтервал довжин хвиль нижче розміщених енергетичних рівнів.

Висновки

1. Проведено теоретичні дослідження спектроенергетичних перетворювачів.
2. Здійснено системний аналіз квантової теорії випромінювання та його взаємодії з найбільш придатними середовищами.
3. Отримані закономірності придатні для розв'язку задачі з перетворення енергії різних діапазонів енергетичного спектру.

Література

1. Рахманов С. А. Проблемы нелинейной оптики / Рахманов С. А., Хохлов Р. В. – М. : ВИНТИ, 1964.
2. Кожем'яко В. П. Теоретичні начала інформаційно-енергетичного перетворення світлового спектру / С. А. Рахманов, П. М. Зузяк, А. Д. Слободяник // *Materialy II Miedzynarodney neukove-praktyeznej konferenciji "Wykształcenie I nauka bez granic – 2005"*. – 2005. – Tom 26. – S. 8–11.
3. Aleksandrovski A.L., Chirkin A.S., Volkov V.V., *J. Russian Laser Res.*, 18, 101 (1997).
4. Кожем'яко В.П. Теоретичні основи перетворення енергії світлового спектру / В.П. Кожем'яко, П.М. Зузяк, С.П. Ларюшкин, А.Д. Слободяник // *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*. – Вінниця, 2006. – № 1(11). – С. 97–101.
5. Воловик П.М. Фізика : підручник для університетів / Воловик П.М. – К.; Ірпінь : Перун, 2005. – 864 с.

References

1. Rahmanov S. A. Problemy nelinejnoj optiki / Rahmanov S. A., Hohlov R. V. – M. : VINITI, 1964.
2. Kozhemiako V. P. Teoretychni nachala informatsiino-enerhetychnoho peretvorennia svitlovoho spektru / S. A. Rakhmanov, P. M. Zuziak, A. D. Slobodianyuk // *Materialy II Miedzynarodney neukove-praktyeznej konferenciji "Wykształcenie I nauka bez granic – 2005"*. – 2005. – Tom 26. – S. 8–11.
3. Aleksandrovski A.L., Chirkin A.S., Volkov V.V., *J. Russian Laser Res.*, 18, 101 (1997).
4. Kozhemiako V.P. Teoretychni osnovy peretvorennia enerhii svitlovoho spektru / V.P. Kozhemiako, P.M. Zuziak, Ye.P. Lariushkyn, A.D. Slobodianyuk // *Оптыко-електронні інформаційно-енергетичні технології*. – Vinnytsia, 2006. – № 1(11). – S. 97–101.
5. Volovyk P.M. Fyzyka : pidruchnyk dlia universytetiv / Volovyk P.M. – K.; Irpin : Perun, 2005. – 864 s.

Рецензія/Peer review : 20.5.2019 р.

Надрукована/Printed : 2.6.2019 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Кичак В.М.

MODELLING OF THE METAL CORRUGATED-ROD ANTENNA WITH TRANSVERSE RADIATION

The question connected with construction of corrugated-rod antennas, that are proportionate with wavelength with transverse radiation to the main antenna axis are considered in this paper. These issues involve selection of impulse function's width and its period, that especially effects on radiation pattern. Features and operation modes of metal corrugated-rod antenna of length 4λ have been researched by using numerical method. Synphase radiation of two surface waves is appearing when the ratio of impulse function period to λ is in the range from 0.697 to 0.742. In this case the first surface wave spreads in forward direction and the second one propagates in the reverse direction due to reflection from the end of antenna structure and as a result disk radiation pattern has been emerged. Relative geometric design parameters of corrugated-rod antenna are presented. The author has achieved radiation patterns by using computer program MATLAB, three-dimensional modelling of corrugated-rod antenna based on finite element method in HFSS technology and by doing experiment. The comparison of the resulted radiation patterns which have been obtained by using numerical methods and by experiment shows a good correspondence between them.

Keywords: surface wave antenna, radiation pattern, surface electromagnetic wave.

I.YU. ТЕПЛЯКОВ
Національний університет «Львівська політехніка»

МОДЕЛЮВАННЯ МЕТАЛЕВОЇ РЕБРИСТО-СТЕРЖНЕВОЇ АНТЕНИ З ПОПЕРЕЧНИМ ВИПРОМІНЮВАННЯМ

У даній роботі розглянуто питання побудови ребристо-стрижневих антен, співрозмірних із довжиною хвилі, які мають випромінювання, поперечне до осі структури. Вони стосуються вибору ширини імпульсної функції та її періоду, що особливо впливає на вигляд діаграми спрямованості. За допомогою чисельного моделювання вивчалися особливості та режими роботи металевої ребристо- стержневої антени довжиною 4λ , отримані розподіли просторового поля в смузі частот. При відношенні періоду імпульсної функції до λ у межах від 0,697 до 0,742 проявляється синфазність випромінювання двох біжучих хвиль, які розповсюджуються в прямому й у зворотному, відбитої від кінця структури, напрямку, що призводить до формування дископодібної діаграми спрямованості. Наведено відносні геометричні конструктивні параметри моделі ребристо-стержневої антени. Діаграми спрямованості отримані за допомогою комп'ютерного середовища MATLAB, тривимірною моделювання ребристо-стрижневої антени методом скінчених елементів в технології HFSS та в ході експерименту. Порівняння результатів розрахованих діаграм спрямованості з отриманими експериментально показує гарну відповідність одне одному.

Ключові слова: антена поверхневої хвилі, діаграма спрямованості, поверхнева електромагнітна хвиля.

Introduction. Surface wave antennas (SWA) play an important part in the modern radio engineering means of microwave range. The interaction effect of surface electromagnetic wave and structure is existed in SWA which appears in slowing down the electromagnetic wave spreading in it. SWA can be a periodically modulated metal structure or combination of two materials: metal and dielectric. Using slowing down directed structure made of dielectric has several disadvantages: considerable losses, weight and cost increase during growth of wavelength and antenna's size. These disadvantages don't exist in SWAs in which periodical metal corrugated structure is used instead of dielectric [1, 2]. The explanation of the interaction effect between surface electromagnetic wave and periodical corrugated structure has been presented in the works [3–7]. Metal corrugated rod antennas (CRA) depending on geometrical form are divided into rod, disk and plane ones. The results of modelling infinite periodical corrugated metal structures are known in the literature [7].

The research problem of SWA radiation diagram in microwave and terahertz ranges has significant scientific and practice importance [1,7]. Relatively high level of side lobes is the peculiar feature of these structures. However, the transverse radiation problem of corrugated structures is remained insufficiently researched. One of the ways to make an impact on phase velocity in the structure and on its radiation pattern for acquire transverse radiation is impedance variation along the structure. Mathematical model [7] that adequately describes electromagnetic field distribution of metal-dielectric endless size structures is well-known. In this work the author considers the issues of verifying adequacy of such a mathematical model for radiate structure commensurate with λ , in which the emission effect is observed with the propagation wave that is being spread in forward direction and also the wave which is being reflected from the end of the structure. There is a way to reduce the effect of the surface wave reflected from the end of the structure on the radiation pattern, which consists in placing an absorbing matched load at the end of the structure. In this case efficiency coefficient is being decreased due to the part of useful energy is being consumed by load.

In connection with the increase of the interest to plasma antennas in the last years, the author believes that the using of plasma as rod of CRA is possible and relevant. It allows to obtain principally new elements of infocommunication means, e.g. interferometers, collimators and radiation means for using in the hidden radar systems [8-11]. It has been analysed to research the possibility of the electric contact influence between metal radial rings and metal rod of CRA on the radiation.

The goal and the problems of this research. The goal of this work is the research of CRA far-field pattern

with transverse radiation using MATLAB and development three dimensional model of such a structure in HFSS technology. It is necessary to examine experimentally the acquired results based on theoretical investigations.

The goal can be achieved in two ways. The resolving of this problem by using mathematical model which describes far-field pattern of periodically modulated metal-dielectric structure has been shown in the first chapter. The resulting radiation patterns indicate efficiency of such a structure while giving constructed parameters. The solution of the problem has been obtained in the second chapter by using software Ansoft HFSS. This technology gives effectively sufficient opportunity to resolve electrodynamics problems for objects that are characterized by complex structure and geometrical shape using the finite element method. The metal CRA model has been developed and the field distribution has been calculated for such an antenna. The comparative analysis of the acquired results points in similarity of character of radiation patterns, which have been received by two methods. The author has made experimental investigation of CRA for verifying the numerical result adequacies.

Modelling of metal corrugated-rod antenna. The strict solution results of electrodynamics problem of excitement of MDS by outside field source has been used as mathematical model and presented in the papers [12, 13]. Such a mathematical model correctly describes MDS on the basic of what it is possible to construct SWAs and CRAs. The results of the field distribution calculation of MDS of infinite sizes based on rectangle impulsive functions shown in the work [7].

Problem formulation of excitement of metal-dielectric structure by the outside field source. Let the infinite plane, which is boundary section of two environment 1 and 2, be characterized by impedance boundary condition [7, 14, 15]:

$$Z_{E(y)} = \frac{E_{y(y)z=0}}{H_{x(x)z=0}}, \tag{1}$$

where E_y and H_x – components of the electric and, respectively, magnetic fields.

Let accept that distribution of the outside sources of field is located in the volume V' with transverse section square $S(y', z')$ and surface impedance value $Z_{E(y)}$ don't depend on coordinate x . It allows to use representation of the field in the upper half space ($z \geq 0$) in the form of an overlay of two-dimensional electric and magnetic waves [7].

Consider the field of electric waves (E-waves). We write impedance bound condition (1) for total E-waves field which consists of the outside sources field and field reflected from plane (fig. 1) as an initial relationship in such a view [7, 12]:

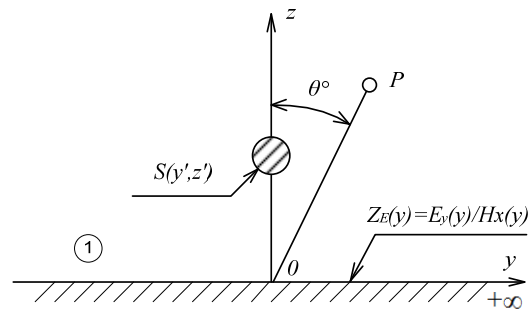


Fig. 1. Modulated impedance plane

$$Z_E(y) = \frac{i}{\omega \epsilon'_a} \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} [f_1(\chi) - F^e(\chi)] \frac{e^{-i\chi y}}{\chi} d\chi}{\int_{-\infty}^{+\infty} [f_1(\chi) - F^e(\chi)] \frac{e^{-i\chi y}}{\chi \sqrt{\chi^2 - k^2}} d\chi}, \tag{2}$$

where $F^e(\chi)$ – spectral density of distribution function of extraneous sources for E-waves; $f_1(\chi)$ – spectral density of reflected field; k – free space wavenumber; $k = 2\pi/\lambda_0$; λ_0 – free space wavelength; $k^2 = \omega^2 \epsilon'_a \mu_a$; χ – generalized space-number (rad/m); ω – angular frequency (rad/s); $\omega = 2\pi/T$; T – period of electromagnetic source's oscillations; ϵ_a, μ_a – permittivity and permeability of environment; the outside source field defines $F^e(\chi)$, that occupies volume V' [15]:

$$F^e(\chi) = \frac{1}{4\pi} \oint \left[\frac{\chi^2}{i\omega \epsilon'_a} j_z^E - i\chi \left(\frac{\pm \sqrt{\chi^2 - k^2}}{i\omega \epsilon'_a} j_z^E + j_x^M \right) \right] e^{i\chi y' \pm \sqrt{\chi^2 - k^2} z'} dy' dz', \tag{3}$$

where j_z^E, j_y^E, j_x^M – given outside electric and magnetic current distribution.

We formulate the problem of analysis in such a setting.

Let the surface impedance distribution $Z_{E(y)}$ to be described by mathematical model:

$$Z_{E(y)} = Z_0 + Z_{M1} \sum \text{rect} \left(\frac{y - n * d_1}{\Delta} \right), \tag{4}$$

where Δ – impulse function's width; d_1 – period of subsequence of impulse function ($d_1 = 2\lambda, 3\lambda, 5\lambda, 10\lambda$); n – infinite subsequence of integers; Z_{M1} – amplitude of rectangular impulse function; Z_0 – surface impedance's direct component; rect – operator which gives the shape of impulse rectangular functions. The law of surface impedance distribution is shown in the graphical view on fig. 2.

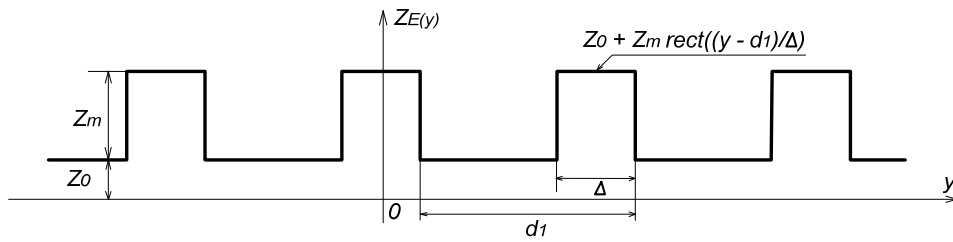


Fig. 2. The law of surface impedance distribution

It is necessary to find the E-waves field in the upper half-space of plane ($z \geq 0$), that satisfies impedance boundary condition (2).

Problem solving of the metal-dielectric structure's excitation by the outside field source as a magnetic current ring. Let MDS has been excited by the outside field source as a magnetic current ring that lies on the structure perpendicularly to modulation direction of structure by periodical inhomogeneities as the impulse rectangular functions. Such an outside field source is convenient to implement technically in the microwave and terahertz wavelength ranges based on MDS. The magnetic current ring is convenient to implement as slot transmission line by using dielectric lining which relative permittivity is ϵ_a . We have substituted spectral density of magnetic current density in the relation (2), according to the problem solving method that is presented in the paper [15].

The problem solving of excited periodically inhomogeneous MDS by the arbitrary outside source field has been obtained in the work [13] in the next view:

$$\xi_1(\chi) \cong \xi_0(\chi) - G(\chi) * \frac{Z_{M1} \frac{\Delta}{2d_1} \sum_{n=-N}^N \xi_0(\chi - n_1 T_1) \text{sinc}\left(\frac{n_1 \pi \Delta}{2d_1}\right)}{D_{1,\Delta}(\chi)}. \quad (5)$$

The first expression describes spectral density of field which has been reflected from the plane with direct impedance (5). The second expression describes the field spectral density that is emerged due to impact of periodical modulation to main surface wave field.

Let MDS is described by relationship (1) and is excited by current source as a magnetic current ring with coordinates:

$$z = 0, \quad y = 0;$$

$$J_x^M(x, y) = I_{x_0}^M \text{rect}\left(\frac{x}{b}\right) \delta(y - 0). \quad (6)$$

Substitution (6) to (3) has given an expression for spectral density of the outside field sources' function of distribution as:

$$\Phi(\chi_1) = \Phi(\chi_1 - n_1 T_1) = -i \left(\frac{I_{x_0}^M}{4\pi} \right) = \Phi_0; \quad \Phi(\chi_2) = \Phi_0 \text{sinc}(b * \chi_2). \quad (7)$$

It is proved in the work [12] that in case spectral density of direct field source is immutable, the spectral density $\xi_i(\chi)$ is described by expression:

$$\xi_1(\chi) \cong \Phi_0 \varphi_0(\chi) \varphi_{1,\Delta}(\chi), \quad (8)$$

where:

$$\varphi_0(\chi) = \frac{2}{\beta_0(\chi)}; \quad \varphi_1(\chi) = \frac{1}{D_{1,\Delta}(\chi)}; \quad \Delta \ll \lambda. \quad (9)$$

Substitution $\chi = k \sin(\theta^\circ)$ to (7) gives the next analytical expression for space field distribution calculation of MDS:

$$\hat{E}(\theta^\circ) = \frac{\cos(\theta^\circ)}{\left[\cos(\theta^\circ) - \hat{Z}_0 \right] \left(1 - \hat{Z}_1 \frac{\Delta}{2d_1} * \sum_{n=-N}^N \frac{\text{sinc}\left(\frac{n\pi\Delta}{2d_1}\right)}{\sqrt{\left(\sin(\theta^\circ) - \frac{n\lambda}{d_1}\right)^2 - 1 - \hat{Z}_0}} \right)}, \quad (10)$$

$$E(\varphi^\circ) = \Phi_0 \left| \text{sinc}\left(\sin(\varphi^\circ) * \frac{b}{\lambda}\right) \right|, \quad (11)$$

where λ – free space wavelength;

Δ – impulse function's width (fig. 2);
 d_1 – period of impulse function's subsequence (fig. 2);

Z_0 and Z_1 – normalized values of surface impedance which is determined by permittivity's magnitude of plate and its thickness, that is varying with periodical law along MDS.

The mathematical model (10) is an analytical functional dependency that describes normalized value of the electric field E depending on the angle of observation θ° for given parameters of MDS's construction. The mathematical model (11) – depending on angle φ° . Computer model has been developed on MATLAB software based on mathematical model (10).

The main advantage of this mathematical model is that it has been obtained in analytical view. It has simplified the development of computer model.

The author has researched an impact of MDS's parameters: width and period of impulse function on SWA's field distribution. Radiation patterns of MDS are shown on fig. 3 and fig. 4. Radiation patterns have been acquired with $d_1/\lambda = 0.712$ on fig. 3.

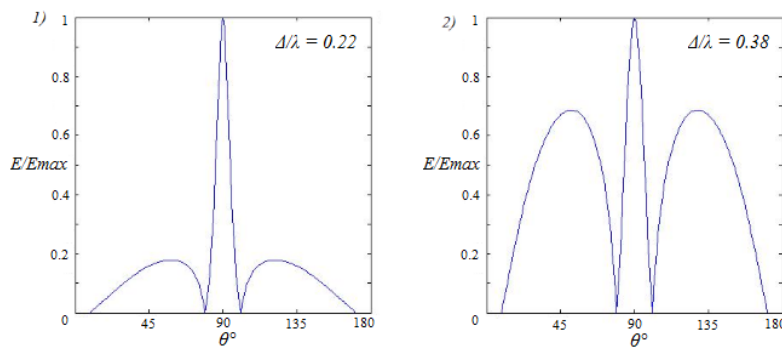


Fig. 3. Radiation patterns with $d_1/\lambda = 0.712$

The analysis of fig. 3 allows making the conclusion that impulse function's width has an effect on radiation pattern of SWA, which is revealing itself in growth of side lobe levels during ratio increasing of the impulse function's width in λ .

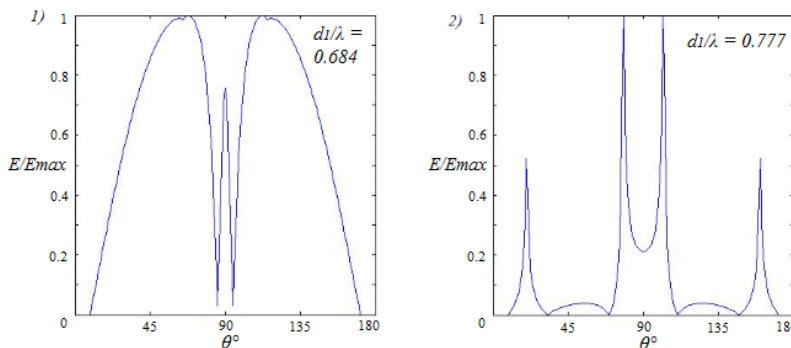


Fig. 4. Radiation patterns with $\Delta/\lambda = 0.38$

As it can be seen on fig. 4 the influence of MDS's geometric sizes is appearing in splitting of the main lobe during increasing of relative period of inhomogeneous. Narrowly focused radiation of main and side lobes of examined antenna has been appeared. This effect can be used during development of high resolution interferometers based on SWA.

The mathematical model (10) does not take into consideration reflected surface wave from the end of the structure. It is necessary to maintain synphase radiation of forward and reflected surface waves by structure during designing of finite size SWA's model. The major problem for developer is to support the radiation by elements which are also included to SWA's structure of equal amount's energy. In the next chapter the author has designed CRA's model which has taken into consideration these factors.

Modelling of metal corrugated-rod antenna with transverse radiation. Dielectric slowing structures have some disadvantages as it has been noticed earlier so as a result the author has replaced dielectric with a system of metal rings. The example of corrugated-rod construction of a surface wave structure has been shown in the work [1]. The dependence of propagated coefficient P from corrugated-rod structure's design of a surface wave is presented in the table 1.

Corrugated surface depending on its geometrical sizes can be considered as artificial dielectric layer in which slowing of surface wave's velocity is occurred accordingly to table 1.

Table 1

Measured relative propagation constant on a corrugated-rod antenna

№ п/п	$(D - d)/\lambda$	P	№ п/п	$(D - d)/\lambda$	P
1	0.15	1.03	6	0.275	1.23
2	0.175	1.05	7	0.30	1.31
3	0.20	1.08	8	0.325	1.47
4	0.225	1.12	9	0.35	1.67
5	0.25	1.16	10	0.375	1.92

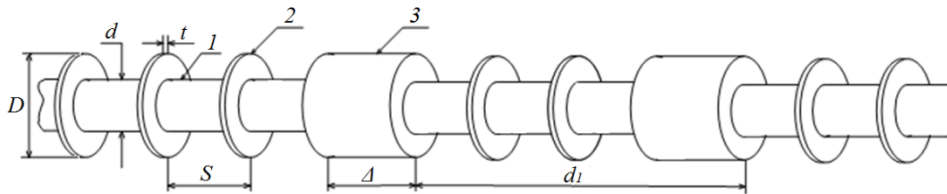


Fig. 5. Metal corrugated-rod antenna's structure

As it can be seen on fig. 5, CRA's structure consists of metal rod (1), metal radial rings (2) and radiating metal radial inhomogeneities (3). Several examples of SWA's power supply with different design have been discussed in the work [2]. In the authors' opinion [2] it is sensible to excite rod antennas by a horn or a vibrator. In this article the CRA has been excited by the conical horn from what the wave has been transmitted to structure of cylindrical surface wave that has been directed along metal corrugated rod. The surface wave is exciting longitudinal ring magnetic currents in metal radial inhomogeneities when they are presented along the rod. These currents cause spreading and radiating of space harmonic spectrum by CRA's structure. At the same time, the surface wave (the main space slowing harmonic of the field) is losing its energy for reradiation by metal radial inhomogeneities during the spreading along corrugated rod of CRA. The period d_i , that is equal to distance between metal radial inhomogeneities, also equals the length of surface wave in CRA. The author has developed CRA's model of length 4λ with transverse radiation. It consists 4 metal radial inhomogeneities of length Δ_i .

The lengths of each metal radial inhomogeneous Δ_i , that have been obtained as a result of radiation pattern form's optimization, are presented in the table 2. Such lengths maintain equal energy that is radiated by each metal radial inhomogeneous.

Table 2

The lengths of each metal radial inhomogeneous

№	1	2	3	4
Δ_i/λ	0,216	0,3	0,372	0,25

The electromagnetic field distributions of CRA at different relative structure's sizes that have been obtained by finite element method in the HFSS technology have been shown on the fig. 6. The summed field in the CRA's far field is a result of outside source field's overlaying and field of induced polarization currents in a metal radial inhomogeneities. The radiation patterns have been computed for structure with parameter $(D - d)/\lambda = 0,31$ on fig. 6.

The radiation patterns have been obtained at length of CRA 4λ . As it can be seen on fig. 6 the direction of the main lobe ranges from 78° to 85° depending on ratio d_i/λ . The width of radiation pattern varies from 20° at $d_i/\lambda = 0,697$ to 19° at $d_i/\lambda = 0,742$. When comparing fig. 4 and fig. 6 it is seen that periodically modulated MDS of finite sizes is characterized by bigger width of radiation pattern's main lobe than MDS of finite sizes. In this case the level of side lobes is much smaller.

Experimental research of metal corrugated-rod antenna. The author has designed CRA's experimental sample of length 4λ which is supported by horn with $d_i/\lambda = 0,712$ and the dimensions of the metal radial inhomogeneities Δ_i that are shown on table 2 for verification and correspondence of the developed numerical models.

A measuring stand has been used for experiment. It has given the opportunity to record CRA's field distribution, estimate side lobe levels, width and shape of the main lobe, fix «zeros» of radiation pattern. The measurement has been done in an anechoic chamber the walls of which are covered by radio absorbing material for impact's decreasing of external noise and reflected electromagnetic waves.

The dependence of standing wave ratio (SWR) on frequency f has being obtained during experiment (fig. 7).

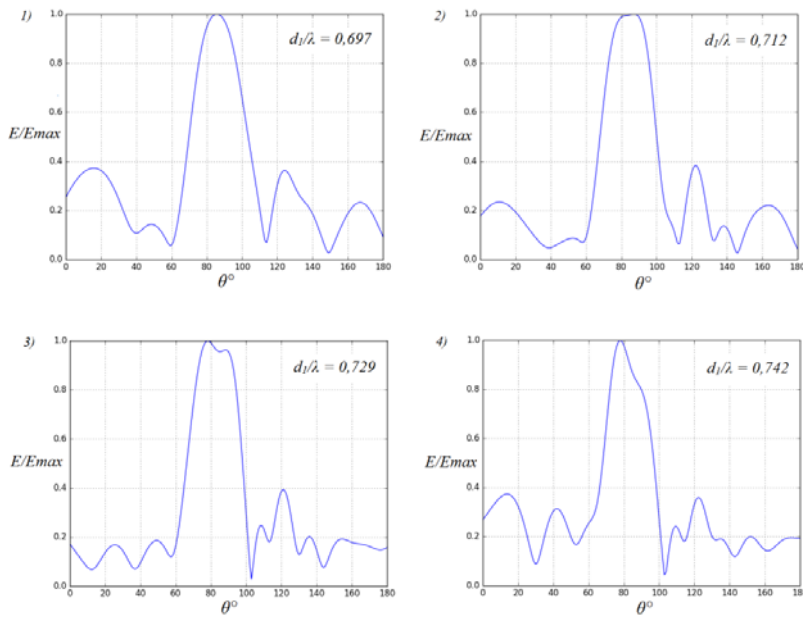


Fig. 6. Radiation patterns of corrugated-rod antenna

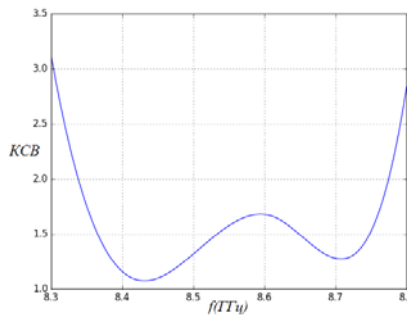


Fig. 7. The dependence of standing wave ratio on frequency

As it can be seen on fig. 7, operating wave frequency is ranged from 8.33 to 8.77 GHz on the SWR's level = 2. The author has being acquired radiation patterns (fig. 8) during experimental research.

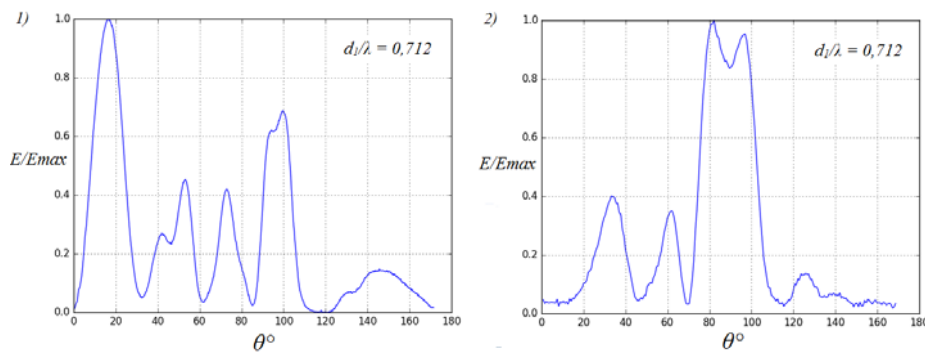


Fig. 8. Radiation patterns of metal corrugated-rod antenna:

1 – without electric contact between metal radial rings and metal rod; 2 – with electric contact between metal radial rings and metal rod

Close to transverse radiation is observed at the angle 97° on the fig. 8.1. The main lobe's width is 16° . The considerable side lobe is appearing also at the angle 17° which is missing on the fig. 8.2. It has been established that the considerable side lobe is appearing in the case of missing electric contact between metal radial ring and metal rod. Transverse radiation to the main antenna axis at $d_1/\lambda = 0,712$ is appearing while the electric contact exists between metal radial ring and metal rod of CRA (fig. 8.2). In this case the main lobe's width is 25° . The negligible splitting of the main lobe is observed that confirms the obtained results during computer modelling.

Summary. The author has developed numerical and computer corrugated-rod antenna's models with transverse radiation. Constructive dimensions for obtaining of transverse radiation pattern of finite length structure have been calculated in the current paper. Load's absence in corrugated-rod antenna's construction at the end of the structure gives the opportunity to use reflected surface wave from the structure's end for its synphase radiation with propagated surface electromagnetic wave from source. It can be used for increasing of corrugated-rod antenna's energy conversion efficiency. The radiation patterns of the structure that have been calculated basing on two models

are similar by form. At this time the expansion of the main lobe, which is caused by finite length of structure, has been observed. The author has examined radiation pattern during the changing of corrugated-rod antenna's constructive parameters. The amount of side lobes have being increased proportionally to increasing of impulse function's period. Experimental research of corrugated-rod antenna's sample of length 4λ has been done for adequacy models' confirmation. The operating frequency band of corrugated-rod antenna's sample is 5%.

References

1. Thomas A. Milligan. Modern antenna design / by Thomas A. Milligan. – 2nd ed. p. cm // TK7871.6.M54, 2005.
2. A.L. Drabkin, V.N. Zuzenko, A.G. Kislov. Antenna-feeder devices. Ed. 2nd, Moscow, «Soviet Radio», 1974.
3. Luigi La Spada, Sajad Haq and Yang Hao. Modeling and design for electromagnetic surface wave devices. Radio Science, 52, pp. 1049–1057, 2017.
4. Anastasios H. Panaretos and Douglas H. Werner. Spoof plasmon radiation using sinusoidally modulated corrugated reactance surfaces. OPTICS EXPRESS 2443, Vol. 24, № 3, 2016.
5. G.S. Kirov, H.D. Hristov. Study of Backfire Antennas. Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications, Vol. 10, No. 1, June 2011.
6. Stephen M. Hanham, Trevor S. Bird, Andrew D. Hellicar, and Robert A. Minasian. Evolved-Profile Dielectric Rod Antennas. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 59, № 4, April 2011.
7. V.V. Hoblyk, V.A. Pavlysh, N.M. Hoblyk, Ye.I. Yakovenko, O.M. Liske, I.V. Nychai, D.V. Nevinskyi, D.A. Nikolayev, I.Yu. Teplakov. Achievements in Antennas Research at Lviv Polytechnic National University. 2017 XI International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT), Kyiv, Ukraine, pp. 50–55.
8. Zhu Anshi, Chen Zili, Wei Jianbin, Zhen Yunhui. Study on Pattern Reconfiguration of Plasma Antenna Excited by Surface Wave. TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering, Vol. 12, No. 9, September 2014, pp. 6658–6666.
9. Paola Russo, Graziano Cerri. Analysis of a reconfigurable plasma antenna. IEEE Conferences, 2016, pp. 1–5.
10. N. Nasr, H. Mehdian, K. Hajisharifi, and A. Hasanbeigi. Analysis of nested design of plasma antenna based on the azimuthally symmetric surface waves: UHF and SHF bands Physics of Plasmas. Physics of Plasmas 24, 2017, pp. 103304-1 – 103304-7.
11. C M Ferreira. Theory of a plasma column sustained by a surface wave. Journal of Physics D: Applied Physics. J. Phys. D: Appl. Phys., 14 (1981) 18.
12. Hoblik V.V. Dis. Ph.D., Kharkiv State University, 1986. 210 p.
13. Hoblik V.V. Analysis of the field over the impedance plane with periodic discrete inhomogeneities by A.F. Chaplin and V. Goblik's method / Theoretical and experimental research methods for the study of antennas and microwave devices: Collection // Lviv Polytechnic in-t. Lviv, 1984. – p. 27–70 – Rus. – Dep. in UkrNIINTI 11.11.84, № 1874. Ukraine – 84.
14. Jean-Ren'e Poirier, Abderrahmane Bendali and Pierre Borderies. Impedance Boundary Conditions for the Scattering of Time-Harmonic Waves by Rapidly Varying Surfaces. IEEE Transactions on Antennas and Propagation (Volume: 54, Issue: 3, March 2006).
15. Talanov V.N. On the question of the radiation of surface wave antennas with a periodically varying surface impedance // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii of the USSR. Radio Physics. – 1960. № 5. P. 802–817.

Рецензія/Peer review : 12.5.2019 р.

Надрукована/Printed : 2.6.2019 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Сторчун Є.В.

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 6. ИЗМЕРЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО УРОВНЯ ФЕРМИ И ЭНЕРГИИ
ФЕРМИ ПРИ НОРМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ ПРОВЕДЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ**

В работе рассмотрен метод измерения энергетического уровня Ферми и метод измерения энергии Ферми исследуемых образцов материалов, их сущность и различия. Приведены уравнения величин, используемые при определении данных величин. Показаны некоторые результаты экспериментальных исследований. Описаны технические решения ряда магнитопольных измерителей уровня и энергии Ферми, возможные варианты их совершенствования. Работа представляет интерес для метрологов, специалистов, магистров и аспирантов, изучающих магнитопольные методы и средства измерения уровня и энергии Ферми в макромире.

Ключевые слова: физические эффекты, магнитные поля, электроны, измерение энергии Ферми, магнитопольные 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 6. Measurement of energy level of Fermi and Fermi's energy
under normal conditions carrying out of measurements**

In paper the method of measurement of Fermi energy level and the method of measurement of Fermi energy of investigated samples of materials, their essence and distinctions is considered. The quantities equations used in the determination of these quantities are given. Some results of experimental researches are shown. Technical decisions of a number magnetic-fields of measurement of level and Fermi energy, possible variants of their perfection are described. For the first time in the world the attention to the question on distinction of concepts «Fermi's level» and «Fermi's energy» and their units of measurements in SI system is sharply brought. Necessity of development magnetic-fields methods of measurements of level and energy of Fermi does not raise the doubts in view of importance of the specified quantities at an estimation and comparison of quality of materials. Development of the given theory causes necessity of working out of standard documents and uniform requirements to normalized parameters, the form and manufacturing techniques of wave guides from samples of investigated materials. The essence of methods of measurement of Fermi's level and Fermi's energy is in detail described, their distinctions are shown. For the first time in the world the communication equations between the physical quantities measured at definition of power level of Fermi and energy of materials are resulted. The equations of measurements of Fermi energy level of and Fermi's energy of materials under normal conditions the carrying out of measurements considering not the private quantities of wave guides, and the sizes led to units of measurements in SI are offered. For the first time in the world technical decisions magnetic-fields measuring instruments of level and energy of Fermi protected by patents of Ukraine are developed, their work, differences and features of realization is described. The greatest interest represent magnetic-fields measuring instruments of level and Fermi's energy on microcontrollers or on microconverters. They provide the greatest level of automation of process of measurements and high accuracy of measurements. The resulted results of experimental researches confirm substantive provisions magnetic-fields theories of measurements and essence of the physical processes proceeding in a material at influence on its solenoidal pulse magnetic field of high frequency. The received results expand our representations about magnetic-fields methods and measuring apparatuses of level and Fermi's energy under normal conditions carrying out of these measurements. The paper is of interest for metrologists, experts, masters and the post-graduate students studying magnetic-fields methods and measuring instruments of level and energy of Fermi in a macrocosm.

Keywords: physical effects, magnetic fields, measurement, Fermi's level, Fermi's energy, magnetic-fields measuring instruments.

Введение. Данная статья является дальнейшим развитием магнитопольной теории измерений (МПТИ), развиваемой в работах [1–16].

Анализ известных магнитопольных эффектов, используемых для определения энергии Ферми металлов, показал, что практически все известные методы исследований уровня Ферми и поверхности Ферми основаны на облучении металлических образцов электромагнитными волнами микроволнового диапазона и на использовании магнитопольных эффектов квантования энергии электронов, проявляющихся при воздействии на металлические образцы сильными магнитными полями и низкими температурами [9].

Среди семи описанных и используемых эффектов эффект Шубникова – де Гааза был 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.

Общим недостатком известных методов измерений энергии Ферми является: использование образцов металлов малых размеров, необходимость создания магнитных полей с большим значением магнитной индукции, а также использование низких температур. Они не предназначены для исследований свойств слабо проводящих и непроводящих материалов [9].

Другим существенным недостатком существующих методов измерения энергии Ферми является отсутствие уравнений связи между физическими величинами, отсутствие метрологического обеспечения наблюдаемых эффектов, методов и средств измерений на их основе.

В основном приводится только качественная картина наблюдаемого эффекта, но не количественная. Создается впечатление, что физики, открывшие описанные выше магнитопольные эффекты, не дружили с метрологией и измерительной техникой.

Ниже изложена сущность магнитопольного метода измерения уровня и энергии Ферми, приводится ряд технических решений средств измерений.

Объектом исследований являются магнитопольные методы и средства измерений.

Предметом исследований является описание сущности, преимуществ и недостатков магнитопольного метода измерения (МП МИ) уровня и энергии Ферми и соответствующих схемотехнических решений магнитопольных измерителей (МПИ).

Результаты исследований

1. Энергетический уровень и энергия Ферми

Многие физики полагают, что уровень Ферми и энергия Ферми — это одно и то же. Так, например, в [13, 14] имеет место запись «Ферми-энергия (уровень Ферми)», «Энергия (уровень) Ферми» и т.п. С метрологической точки зрения такое предположение является ошибочным. Уровень и энергия — это два разных понятия, имеющих разный физический смысл. В [15], например, справедливо утверждается, что «уровень Ферми — некоторый условный уровень, соответствующий энергии Ферми системы фермионов» (Уровень Ферми обозначим как E_{FL} , где индекс FL — от слов «Fermi Level» и будем называть его «энергетическим уровнем Ферми»). Фермион (ферми-частица) — частица или квазичастица с полуцелым спином: электрон, протон, нейтрон, кварк. Полагаем, что энергетический уровень Ферми должен определяться приведенным к единице площади материала (вещества), т.е. к 1 м^2 в системе СИ, а энергия Ферми, к единице объема материала (вещества), т.е. к 1 м^3 . Нами разработаны технические решения средств измерений энергетического уровня Ферми и энергии Ферми исследуемых материалов. Рассмотрим их работу без использования сложных математических выкладок.

Положение энергетического уровня является одной из основных характеристик состояния электронов (электронного газа) в твердом теле. Вероятность заполнения энергетических состояний электронами в квантовой теории определяется, как известно, функцией Ферми

$$F_x(E_{FL_x}) = 1 / \left(e^{(E_{FL_x} - E_{FL_0})/k_B T} + 1 \right), \quad (1)$$

где E_{FL_x} — энергетический уровень, вероятность заполнения которого определяется; E_{FL_0} — характеристический энергетический уровень, относительно которого кривая вероятности симметрична; T — абсолютная температура; k_B — постоянная Больцмана.

Из (1) следует, что при абсолютном нуле функция Ферми $F_x(E_{FL_x})_{\text{при } E_{FL_x} = E_{FL_0}} = 1$ и $F_x(E_{FL_x})_{\text{при } E_{FL_x} > E_{FL_0}} = 0$, т.е. все состояния, лежащие ниже уровня Ферми, полностью заняты электронами, а выше него свободны. Другими словами, функция Ферми равна единице при $\{E_{FL_x}\} = \{E_{FL_0}\}$, т.е. при равенстве значений энергетического уровня Ферми и характеристического энергетического уровня. Однако, при $\{E_{FL_x}\} > \{E_{FL_0}\}$, функция Ферми равна нулю.

Энергетический уровень Ферми для электронов играет роль уровня химического потенциала для незаряженных частиц [15]. Соответствующий ей потенциал $j_{FL_x} = E_{FL_x} / e$ называют электрохимическим потенциалом. Однако в работе [15] делается некорректный вывод о том, что «... уровнем Ферми или энергией Ферми в металлах является энергия, которую может иметь электрон при температуре абсолютного нуля». Если говорить о всех электронах в единице объема, тогда говорят уже об энергии материала или вещества. Сами авторы справедливо отмечают, что, в отличие от энергетического уровня Ферми, для электронного газа в металлах при температуре абсолютного нуля ($\{T\} = 0$) значение энергии Ферми (обозначается как E_F) однозначно определяется концентрацией электронов и ее можно выразить через число n частиц электронного газа в единице объема. Причем зависимость энергии Ферми E_F от концентрации электронов нелинейная.

2. Измерение энергетического уровня и энергии Ферми при нормальных условиях проведения измерений. Известно, что без действия внешнего электромагнитного поля электроны в веществе, вращающиеся по своим орбитам, движутся хаотично и перемещаются куда угодно — вдоль материала, поперек, по диагонали, по спирали и т.п. Поэтому сумма всех векторов скоростей электронов в любой момент времени равна нулю. При приложении внешнего магнитного поля к собственному вектору скорости добавляется составляющая, которая параллельна вектору распространения силовых линий напряженности магнитного поля. Поскольку данный вектор скорости добавляется к вектору скорости каждого электрона, то сумма векторов уже не равна нулю. Говорят, что электроны стали двигаться упорядоченно (как бы с

небольшим дрейфом вдоль линий поля). В этом случае электрон начинает двигаться как по своей орбите, так и вдоль магнитных силовых линий, то есть по спирали. Скорость движения электронов составляет единицы мм /сек.

Согласно принципу Паули, даже при $T = 0$ электроны металла не покоятся, а движутся с разными энергиями. Максимальная энергия, которую имеют электроны, называется энергией Ферми.

Рассмотрим техническую задачу разработки метода измерения внутренней энергии Ферми материалов в предположении, что материал, из которого изготавливается волновод, имеет приповерхностный слой, содержащий заряженные квазичастицы. Другими словами, вначале соленоидальное импульсное магнитное поле высокой частоты взаимодействует с заряженными частицами приповерхностного слоя материала, сметает его, а затем начинает взаимодействовать с электронами самого материала.

2.1. Магнитопольевые методы измерения и их особенности

В работе [9] проанализированы и описаны известные физические эффекты и методы измерения энергии Ферми, указаны недостатки в их реализации.

Рассмотрим магнитопольевые методы измерения энергетического уровня Ферми и внутренней энергии исследуемого образца материала (энергии Ферми) при нормальных условиях проведения измерений, прежде всего без использования сверхнизких температур.

Как было показано в работах [8–10, 12], магнитопольевые методы основаны на новом физическом принципе измерений — явлении переноса энергии и информации через материал в результате взаимодействия искусственно созданного соленоидального импульсного магнитного поля (сверх)высокой частоты с электронами исследуемого материала, из которого изготовлен волновод.

Волновод, как функциональный элемент, как источник энергии Ферми исследуемого материала, изготавливается в виде симметричной плоской двухконтурной механической системы замкнутого типа, — плоского волновода или резонатора (рис. 1), выполненного в виде двух плоских одновитковых или многовитковых спиральных катушек индуктивности, соединенных между собой параллельно (рис. 1, а) или последовательно (рис. 1, б), без и с пространственным инвертированием одного из контуров (рис. 1, а, д).

Такая конфигурация обеспечивает выполнение закона сохранения механической энергии движущихся электронов. В волноводах в качестве исследуемого материала может быть использована листовая медь, листовая алюминий, свинец, полипропилен, текстолит или любой другого листового материал. В резонаторах используются преимущественно медный или серебряный провода.

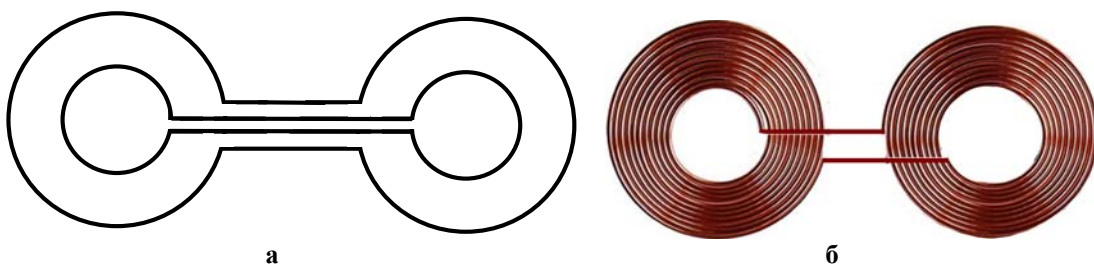
При необходимости включения измерителя тока, в волноводе делается разрыв замкнутого контура по центру симметрии и устанавливаются токопроводящие контакты, как показано на рис. 1, в, е. В резонаторе выводами служат сами провода катушек индуктивности (рис. 1, г).

Оба контура волновода образуют замкнутую двухконтурную механическую систему. В общем случае измерения энергии Ферми как металлов, так и диэлектриков, частота собственного резонанса двухконтурной системы может не совпадать с частотой сигнала (сверх)высокой частоты. В этом случае используются волноводы, а не резонаторы. В случаях измерения энергии Ферми только металлов, может быть использованы волноводы-резонаторы, настроенные на определенные частоты. Ниже будем говорить только о волноводах.

Для получения достоверных результатов измерений волновод изготавливается из исследуемого материала с нормированными по размерам толщиной h_{B0} и площадью поверхности s_{B0} , например, $h_{B0} = 1 \text{ мм}^2$, а $s_{B0} = 1000 \text{ мм}^2$. В этом случае объем волновода составит $v_{B0} = 1000 \text{ мм}^3$, что, позволяет достаточно легко вычислить энергетический уровень Ферми и энергию Ферми материала, приведенные к единице площади и объема волновода.

Обеспечение единства измерений возможно только в том случае, если будут выработаны нормативные требования и документы по изготовлению волноводов с заданными параметрами из образцов исследуемых материалов, а также разработаны методики определения значений энергии и уровня Ферми при нормальных условиях проведения измерений. На сегодняшний день это главная задача МОЗМ.

Для реализации магнитопольевого метода измерения формируется две пары идентичных по параметрам высокочастотных входных и выходных параллельных колебательных контуров L_1, L_2 и L_3, L_4 (см. рис. 2, а, б).



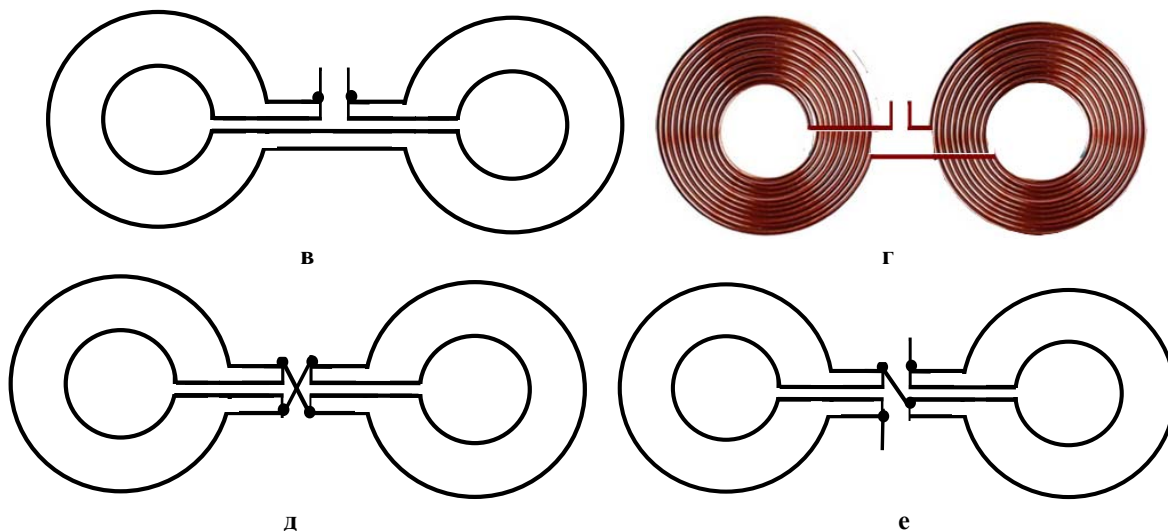


Рис. 1. Варианты плоских волноводов (резонаторов)

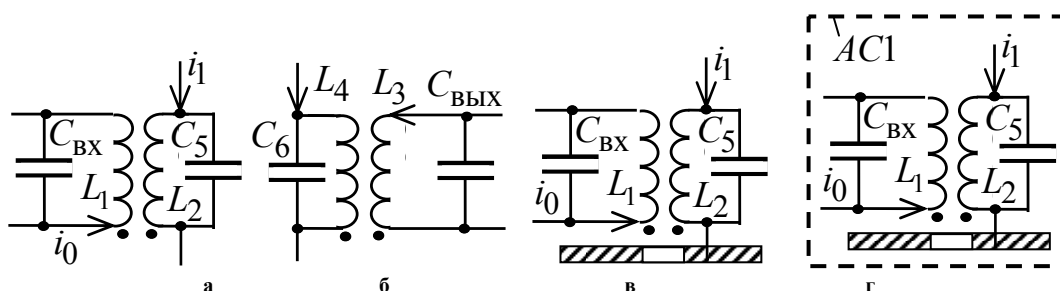


Рис. 2. Графическое изображение расположения колебательных контуров

Первая пара идентичных по значениям параметров входных и выходных колебательных контуров $L_1C_{\text{ВХ}}$ и L_2C_5 первой катушки индуктивности располагается над первым контуром волновода (рис. 2, в), а вторая пара идентичных входных и выходных колебательных контуров $L_3C_{\text{ВЫХ}}$ и L_4C_6 второй катушки индуктивности располагается над вторым контуром волновода. На приведенных в статье схемах магнитопольных измерителей конденсаторы $C_{\text{ВХ}}$ и $C_{\text{ВЫХ}}$ не показаны.

Катушки индуктивности с парами колебательных контуров располагаются в пространстве таким образом, чтобы их оси и центральные силовые линии магнитного поля высокой частоты были направлены перпендикулярно площади поверхности волновода (см. рис. 2, в, г).

С целью защиты колебательных контуров и волновода от воздействия внешних магнитных полей, первая и вторая катушки индуктивности вместе с первым и вторым плоскими контурами волновода размещаются внутри броневого ферритовых сердечников с априори заданной магнитной проницаемостью и частотной характеристикой. На рис. 2, г броневого ферритовый сердечник $AC1$ изображен в виде пунктирной линии. Один из вариантов внешнего вида системы экранированных контуров (многоконтурной электромеханической системы) показан на рис. 3, а. На рис. 3, б приведено графическое изображение плоского двухконтурного волновода, где стрелками условно показано движение электронов в материале волновода.

Расстояние l_1 между центрами $O_{\text{Д}}, O_{\text{П}}$ катушек индуктивности (центрами броневого ферритовых сердечников) и габаритный размер (длина) волновода l_2 выбираются с учетом размеров броневого ферритовых сердечников и межцентрового расстояния,

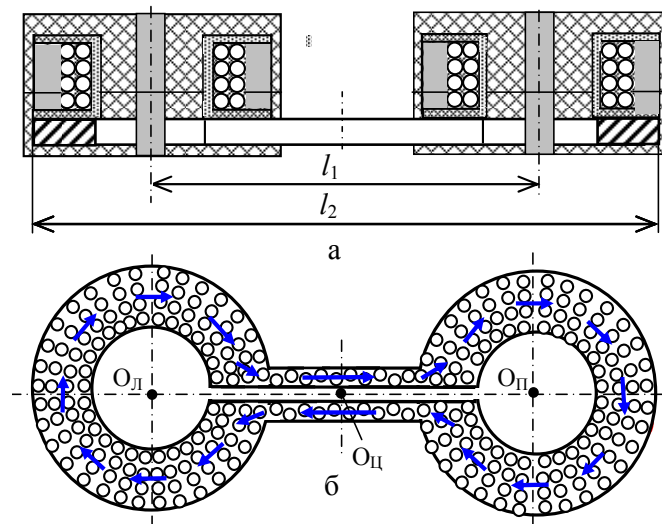


Рис. 3. Графическое изображение: а) многоконтурной электромеханической системы; б) потока отрицательно заряженных частиц, движущихся по замкнутому контуру плоской двухконтурной механической системы замкнутого типа

Сущность метода заключается в следующем. Вначале одним из известных методов измеряется или вычисляется, например по чертежам, площадь поверхности S_x волновода и средняя длина l_x замкнутого контура волновода, сквозь материал которого движутся электроны (см. рис. 3, б, пунктирная кривая). Резистор и конденсатор RC -нагрузки выбираются с априори заданными с высокой точностью значениями. Это необходимо для установления требуемого значения постоянной времени RC -нагрузки. Измерение и выбор указанных величин необходимо для вычисления значения искомой физической величины — уровня энергии Ферми.

Затем генерируется ток прямоугольной формы (типа меандр), —

$$i_1(t) = I_m \left[\frac{k_1}{k_2} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(k_2 n - k_1) \omega_0 t}{k_2 n - k_1} \right] \quad (1)$$

где $k_1 = 1, k_2 = 2$; I_m — амплитуда тока, высокой или сверхвысокой и стабильной частоты ω_0 с нормированной по значению амплитудой I_m .

Импульсы тока (1) высокой частоты пропускаются через катушку индуктивности L_2 входного колебательного контура $L_2 C_5$ первой пары колебательных контуров (рис. 2, а, в, г). Часть сигнала, например, 1% – 5 (10)% от среднего значения тока, наведенного в контуре $L_1 C_{вх}$, направляется во встречном направлении по отношению к направлению течения тока в колебательном контуре $L_2 C_5$ (рис. 2, а). Это осуществляется за счет выпрямления с помощью диода высокочастотного напряжения, наведенного во входном контуре $L_1 C_{вх}$ (рис. 2, а). Известно, что если токи в проводниках текут в разных направлениях, то на проводники действует сила, которая притягивает их друг к другу. Тем самым обеспечиваются дополнительные емкостные и взаимно индуктивные связи между колебательными контурами в зависимости от силы тока i_0 . Сила тока i_0 устанавливается в пределах нескольких микроампер.

Во второй паре колебательных контуров $L_4 C_6$ и $L_3 C_{вых}$ в катушках индуктивности токи текут в одном и том же направлении — сверху вниз (рис. 2, б).

«Горячие» концы катушек индуктивности (см. рис. 2 — звездочки у нижней части катушки) двух пар входных и выходных колебательных контуров располагаются со стороны поверхности исследуемого материала — источника энергии Ферми, как показано на рис. 2, в, г и тем самым обеспечивается индуктивная и емкостная связи с поверхностью контуров волновода. Следует отметить, что катушки индуктивности колебательных контуров рекомендуется изготавливать равными по значению индуктивности, т.е. $\{L_1\} = \{L_2\} = \{L_3\} = \{L_4\} = \{L_0\}$.

Для управления током высокой частоты в части формирования пачек импульсов, генерируется сигнал низкой частоты коммутации

$$u_1(t) = U_0 \left[\frac{k_1}{k_2} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(k_2 n - k_1) \Omega_k t}{k_2 n - k_1} \right], \quad (2)$$

где $k_1 = 1, k_2 = 2$; U_0 — максимальное значение сигнала частоты коммутации, — при математическом описании нечетных полупериодов сигнала, и

$$u_2(t) = U_0 \left[\frac{k_1}{k_2} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(k_2 n - k_1) \Omega_K t}{k_2 n - k_1} \right], \quad (3)$$

— при описания четных полупериодов сигнала.

Синхронизация сигналов (2) и (3) низкой частоты высокочастотным сигналом (1) достигается за счет обеспечения кратности частот, т.е. при $\Omega_K = \omega_0 / n$, где n — целое число, например, $n = 1000 \dots 5000$.

В нечетные полупериоды низкой частоты коммутации ток

$$i_2(t) = I_{m2} \left[\frac{k_1}{k_2} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(k_2 n - k_1) \omega_0 t}{k_2 n - k_1} \right] \left[\frac{k_1}{k_2} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(k_2 n - k_1) \Omega_K t}{k_2 n - k_1} \right], \quad (4)$$

где I_{m2} — амплитудное значение тока, протекающий через второй колебательный контур $L_2 C_5$, формирует в катушке индуктивности соленоидальное импульсное магнитное поле высокой частоты с энергией

$$E_{M1} = L_2 [i_2(t)]^2 / k_2, \quad (5)$$

где L_2 — индуктивность выходного колебательного контура первой пары высокочастотных контуров.

Силовые линии импульсного магнитного поля в нечетные полупериоды сигнала (2) низкой частоты коммутации воздействуют, поочередно, на электроны первого плоского контура волновода. В четные полупериоды сигнала (3) низкой частоты коммутации импульсное соленоидальное магнитное поле высокой частоты на электроны волновода не воздействуют. В четные полупериоды электроны возвращаются в исходные состояния.

Периодическое силовое воздействие импульсного магнитного поля на электроны материала волновода приводит к их сложному колебательно-вращательно-поступательному движению и возникновению в материале волновода токов смещения и токов проводимости (в металлах) или токов смещения и токов переноса (в диэлектриках). Токи смещения возникают за счет смещения всей совокупности связанных электронов первого контура волновода относительно некоторого их “среднего” положения по глубине расположения в слое материала. По-нашему мнению, связанные электроны образуют (дышащую) стоячую волну сложной формы поперёк поверхности исследуемого материала. Ее минимумы и максимумы формируются периодически, с низкой частотой коммутации. Период возникновения стоячей волны равен периоду частоты коммутации $T_K = k_2 \pi / \Omega_K$, где $k_2 = 2$.

Токи проводимости и токи переноса обусловлены сложным (колебательно-вращательно-поступательным) движением электронов по замкнутому контуру волновода. Их движение условно показано стрелками на рис. 3, б.

За счет высокочастотных колебаний свободных электронов возникает продольная высокочастотная электромагнитная волна, которая переносит энергию электронов по замкнутому контуру волновода. Это осуществляется благодаря силовому воздействию на свободные электроны импульсного соленоидального магнитного поля высокой частоты, сил Кулона и сил Лоренца.

Фактически в волноводе формируются поперечная и продольная электромагнитные волны, несущие энергию электронов. Свободные электроны обтекают поверхность стоячей волны.

В целом, электромагнитное поле, создаваемое движущимися электронами, наводит во входном колебательном контуре $L_4 C_6$ второй пары колебательных контуров электродвижущую силу (ЭДС) $u_{FL}(t)$ высокой частоты, которая, при идентичных контурах, равна или пропорциональна значению энергетического уровня Ферми, полученному при нормальных условиях проведения измерений, в частности, при температуре окружающей среды равной, например, 20°C .

Полученный сигнал $u_F(t)$ трансформируется в выходной колебательный контур $L_3 C_{\text{вых}}$ с априори заданным коэффициентом трансформации k_T .

Выходной сигнал пассивного колебательного контура $L_3 C_{\text{вых}}$, индуктивно связанный с контуром $L_4 C_6$, математически описывается следующим образом:

$$u'_{FL}(t) = k_T u_{FL}(t). \quad (6)$$

Затем напряжение (6) выпрямляется и усредняется согласно аналитическому выражению:

$$U_x = \sqrt{\frac{R_H}{T'_K} \int_0^{T'_K} |i_{k2}(t)| dt} = \sqrt{\frac{k_1}{T'_K} \int_0^{T'_K} |u'_{FL}(t)| dt} = k_T S_{\text{п1}} E_{FL}, \quad (7)$$

где $T'_K = n T_K$ — время интегрирования, кратное периоду частоты коммутации ($n = 1-100$ и более); R_H — сопротивление нагрузки выходного колебательного контура $L_3 C_{\text{вых}}$ второй пары колебательных контуров; $i_{k2}(t)$ — ток в колебательном контуре $L_3 C_{\text{вых}}$; $S_{\text{п1}}$ — крутизна преобразования энергии Ферми в напряжение.

Следует отметить, что усреднение напряжения обеспечивается за счет использования RC -нагрузки,

осуществляющей усреднение высокочастотных колебаний при априори заданном значении постоянной времени. Напряжение (7) измеряется и запоминается. По результатам измерений полученного напряжения и площади поверхности материала волновода вычисляется значение энергетического уровня Ферми, приведенное к единице площади исследуемого материала.

Действующее значение энергетического уровня Ферми исследуемого образца материала, приведенное, согласно СИ, к единице пути (к 1 м) и к единице площади (к 1 м²), определяется, при нормальных условиях выполнение измерений, согласно уравнению величин

$$E_{FL} = s_{\text{пр}} \frac{S_0}{S_x} \frac{U_x^2 t_x}{R_H} \frac{l_0}{l_x} \text{эВ} = s_{\text{пр}} \frac{l_0}{l_x} \frac{S_0}{S_x} \frac{U_x^2 t_x}{R_H} \text{эВ} = s'_{\text{пр}} \frac{U_x^2 t_x}{R_H} \text{эВ}, \quad (8)$$

где E_{FL} — энергетический уровень Ферми (FL – Fermi Level) $s_{\text{пр}}$ — крутизна преобразования, эВ/Дж; l_x — средняя длина замкнутого контура волновода по которому движутся электроны, м; l_0 — нормированная по значению длина контура волновода, равная 1 м; S_0 — нормированная по значению площадь поверхности материала волновода, на который действует магнитное поле, 1 м²; S_x — реальная площадь исследуемого материала волновода, м²; $t_x = n\tau_0$ — время усреднения; $n = 1, 2, 3, \dots$; τ_0 — постоянная времени интегрирования ($\tau_0 = 1$ с); $U_x = U_{\text{хсв}}$; R_H — сопротивление RC -нагрузки; $s'_{\text{пр}} = s_{\text{пр}} / l_x S_x$ эВ/Дж при $l_0 = 1$ м, $S_0 = 1$ м².

Такова сущность магнитополевого метода измерения энергетического уровня Ферми.

Метод измерения энергии Ферми материалов аналогичный описанному, но имеет свои отличительные особенности. Во-первых, для определения конечного результата, дополнительно измеряется объем V_x волновода в м³. Во-вторых, что очень важно, измеряется действующее значение $I_{\text{вч}}$ высокочастотного тока, протекающего по замкнутому контуру внутри материала волновода. Это достигается путем разрыва цепи указанного контура (рис. 1, в, г, е) и включением в этот разрыв соответствующего измерителя тока, реализующего, например, метод токового трансформатора, термоэлектрический метод измерения и другие. В-третьих, действующее значение энергии Ферми материала определяется при нормальных условиях выполнения измерений при приведенных, согласно СИ, к единице измерения не только средней длины пути электронов, которые движутся по замкнутому контуру волновода (в метрах), но и к единице объема материала волновода (в метрах кубических) по уравнению величин

$$E_F = S_{\text{пр}} \frac{l_0}{l_x} \frac{V_0}{V_x} U_x I_{\text{вч}} t_x \text{эВ} = S_{\text{пр}} \frac{l_0}{l_x} \frac{V_0}{V_x} U_x I_{\text{вч}} t_x \text{эВ} = S''_{\text{пр}} U_x I_{\text{вч}} t_x \text{эВ}, \quad (9)$$

где $S''_{\text{пр}}$ — крутизна преобразования, Дж; $S''_{\text{пр}} = S_{\text{пр}} / l_x V_x$, Дж, при $l_0 = 1$ м и $V_0 = 1$ м³.

Описанные методы являются пионерскими и не имеют аналогов. Они открыли новую страничку в истории измерений и обеспечили возможность фундаментальных исследований энергетических свойств любых материалов.

Особенностями описанных магнитолевых методов измерений является формирование стабильного и нормированного по значению амплитуды, частоты и скважности тока прямоугольной формы (типа меандр). Такой ток обеспечивает формирование соленоидального импульсного магнитного поля высокой частоты. Его действие на электроны исследуемого материала приводит к их сложному движению по замкнутому контуру волновода. Возникающая высокочастотная электромагнитная волна осуществляет бесконечно длительный групповой перенос энергии электронов по замкнутому контуру, — до прекращения действия магнитного поля.

Повышенная точность и чувствительность магнитолевых измерений обеспечивается за счет высокого качества изготовления волноводов и высокочастотных колебательных контуров, генерирования сигналов высокой (например, $10 \cdot 10^6$ Гц) и стабильной частоты с нормированной по значению амплитудой (например, 2 В), за счет формирования, как правило, синфазного сигнала низкой частоты коммутации ($1 \cdot 10^3$ Гц) со скважностью два путем деления высокой частоты в заданное число раз, например, в 10000 раз, то есть $10 \text{ МГц} / 10000 = 1 \text{ кГц}$, а также за счет использования измерительных приборов высокого класса точности.

3. Технические решения магнитолевых измерителей энергетического уровня Ферми и энергии Ферми. 3.1. Магнитолевой измеритель уровня Ферми

На рис. 4 приведен один из простых вариантов реализации метода измерения энергетических уровней Ферми. На приведенной схеме устройства для измерения энергетического уровня Ферми используются следующие обозначения: ИП — источник питания; ЦВ — цифровой вольтметр; МГ — микрометрическая головка; ГЧК — генератор частоты коммутации; VT 1 и VT 2 — первый и второй транзисторы; ZQ — кварцевый резонатор с металлическими накладками; R1, R2, R3, R4 и R5 — первый,

второй, третий и четвертый резисторы; $C1, C2, C3, C4, C5$ и $C6$ — первый, второй, третий, четвертый пятый и шестой конденсаторы; $VD1$ и $VD2$ - первый и второй диоды; $L1$ и $L2$ — первая и вторая катушки индуктивности первой пары идентичных колебательных контуров; $L3$ и $L4$ — первая и вторая катушки индуктивности второй пары идентичных колебательных контуров; WG — источник энергии Ферми, выполненный из плоского исследуемого материала в форме восьмерки; $AC1$ и $AC2$ — первый и второй бронированные ферритовые сердечники; Кн — двойная кнопка «сброс показаний»; ЦМ — цифровой микроамперметр.

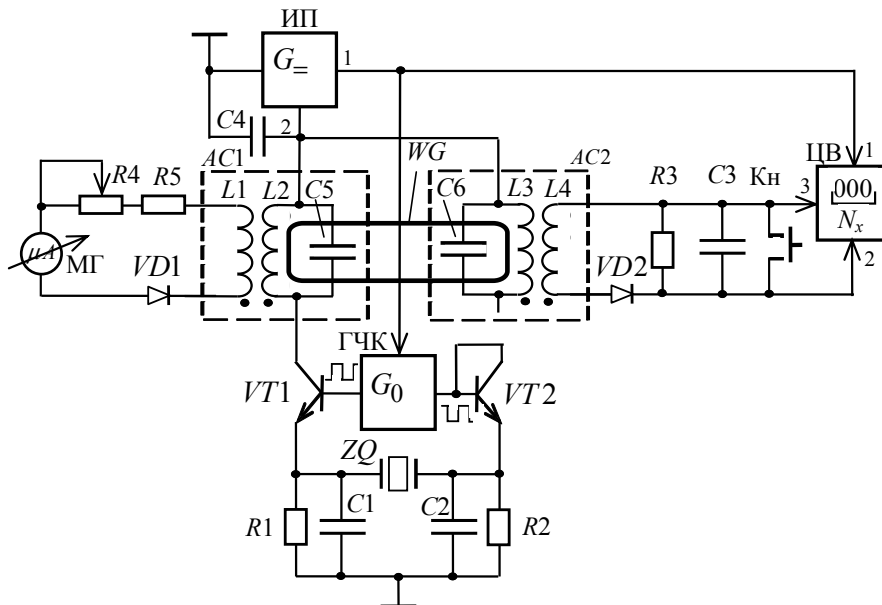


Рис. 4. Структурно-функциональная схема устройства для измерения энергетического уровня Ферми

Стабильность частоты тока обеспечивается за счет использования кварцованного генератора импульсов, выполненного на транзисторах $VT1$ и $VT2$, кварцевом резонаторе ZQ , резисторах $R1$ и $R2$ и генераторе низкой частоты коммутации ГЧК. Причем, коллектор первого транзистора VT нагружен на катушку индуктивности $L2$. Коллектор второго транзистора VT может быть нагружен на катушку индуктивности $L3$ (при двухтактном режиме работы устройства) или соединен с его базой (— диодное включение), как показано на рис. 4 (при однотактном режиме работы).

Для стабилизации амплитуды тока в устройстве используется отрицательная обратная связь по току, формирующему магнитный поток. Для этого первая катушки индуктивности $L1$, индуктивно связанная с катушкой $L2$ первой пары идентичных колебательных контуров, нагружается на цепочку последовательно включенных между собой токоограничивающего резистора $R1$, подстроечного резистора $R2$, микрометрическую головку МГ и диод $VD1$. ЭДС, наведенная в катушке индуктивности $L1$, выпрямляется диодом $VD1$ таким образом, чтобы направление тока в ней было противоположным направлению тока через катушку индуктивности $L2$. Ток обратной связи устанавливается в пределах 0,1% — 5 (10)% от максимального значения тока, протекающего через катушку индуктивности $L2$. Установка тока обратной связи осуществляется путем подбора значений переменного резистора $R4$ и токоограничивающего резистора $R5$. Действительное значение тока отображается на шкале микрометрической головки МГ. Таким образом устанавливается отрицательная обратная связь по магнитному потоку.

Постоянная времени RC -нагрузки (резистор $R3$ и конденсатор $C3$) выпрямителя (диод $VD2$) устанавливается равной 1 с, т.е. $t_x = 1$ с.

Сброс показаний цифрового вольтметра ЦВ осуществляется с помощью кнопки Кн, включенной параллельно конденсатору $C3$ RC -нагрузки.

По результатам измерений осуществляется расчет энергетического уровня Ферми согласно уравнению числовых значений (при $l_0 = 1$ м, $S_0 = 1$ м²)

$$E_{FL} = \{s_{пр}\} \frac{\{I_0\} \{S_0\} \{U_x\}^2 \{t_x\}}{\{I_x\} \{S_x\} \{R_H\}} = \frac{\{s_{пр}\}}{\{I_x\} \{S_x\}} \cdot \frac{\{U_x\}^2 \cdot \{t_x\}}{R_H} = \{s'_{пр}\} \left[\frac{\text{эВ}}{\text{Дж}} \right] \cdot \frac{\{U_x\} \{t_x\}}{\{R_H\}} [\text{Дж}] = \{s'_{пр}\} \frac{\{U_x\}^2 \{t_x\}}{\{R_H\}} \text{эВ} \quad (10)$$

при нормальных условиях проведения измерений.

3.2. Магнитопольевой измеритель энергетического уровня Ферми

Процесс измерений с помощью устройства, структурно-функциональная схема которого приведена

на рис. 4, можно автоматизировать, если дополнительно ввести цифровой измеритель тока ЦИТ, управляемый цифровой секундомер, арифметико-логическое устройство АЛУ и цифровое отсчетное устройство ЦОУ. В этом случае структурно-функциональная схема устройства примет вид [12], приведенный на рис. 5.

Данное техническое решение магнитополевого измерителя энергетического уровня Ферми было разработано в связи с предположением, что на поверхности волновода существует приповерхностный слой из заряженных частиц.

Как показано в работе [16], в металлах свободные электроны начинают хаотически перемещаться в межатомном пространстве, соударяясь с электронными оболочками атомов и обмениваясь с ними энергией. Этим объясняется хорошая теплопроводность металлов. Часть свободных электронов выходит на поверхность металла, создавая приповерхностный слой. В приповерхностном слое электроны могут объединяться и создавать цепочки или целую поверхность, названую В.А. Ацюковским «поверхностью Ферми». Расположение электронов оказывается устойчивым: каждый «держится» за своих соседей, они как кольчугой закрывают поверхность металла (рис. 5). При этом сумма электрических и магнитных полей стремится к нулю, и поверхность металла в целом не будет иметь ни электрического заряда, ни магнитного поля. Такое представление о приповерхностном слое металлов является новым и представляет научный интерес и для метрологов.

Рассмотрим работу магнитополевого измерителя, приведенного на рис. 6, для случая, когда используются уравнения измерений без приведения результатов измерений к единице площади и объема материала волновода.

В этом случае процесс измерений следует разделить на два этапа: 1) измерение времени (τ_x и $4,6\tau_x$) и скорости (v_x) переходного процесса с момента времени воздействия импульсного магнитного поля на исследуемый материал, до перевода его в новое состояние за заданный промежуток времени $t_{x1} \leq T_k$, меньший периода сигнала частоты коммутации, например, за 1–100 мкс; 2) — измерение и вычисление энергетического уровня Ферми исследуемого материала, из которого выполнен волновод.

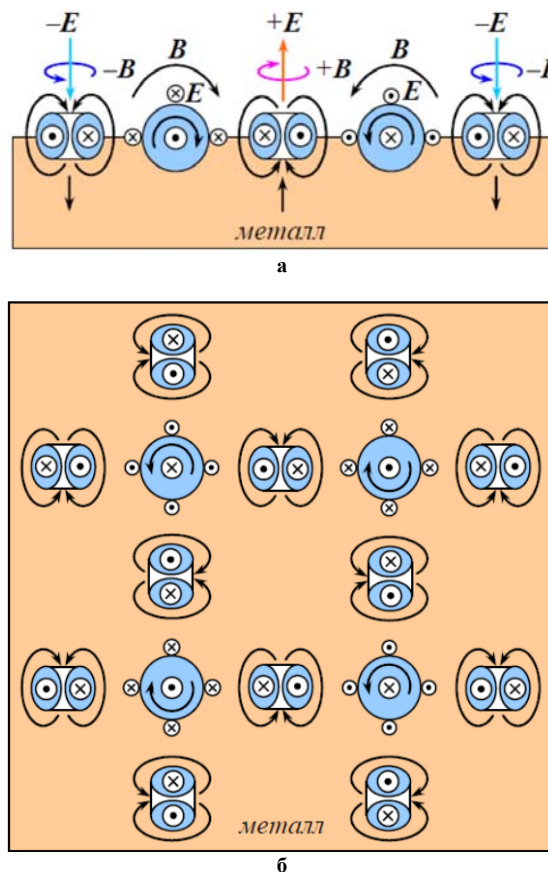


Рис. 5. Электроны на поверхности металла: а) вид в разрезе, б) вид сверху

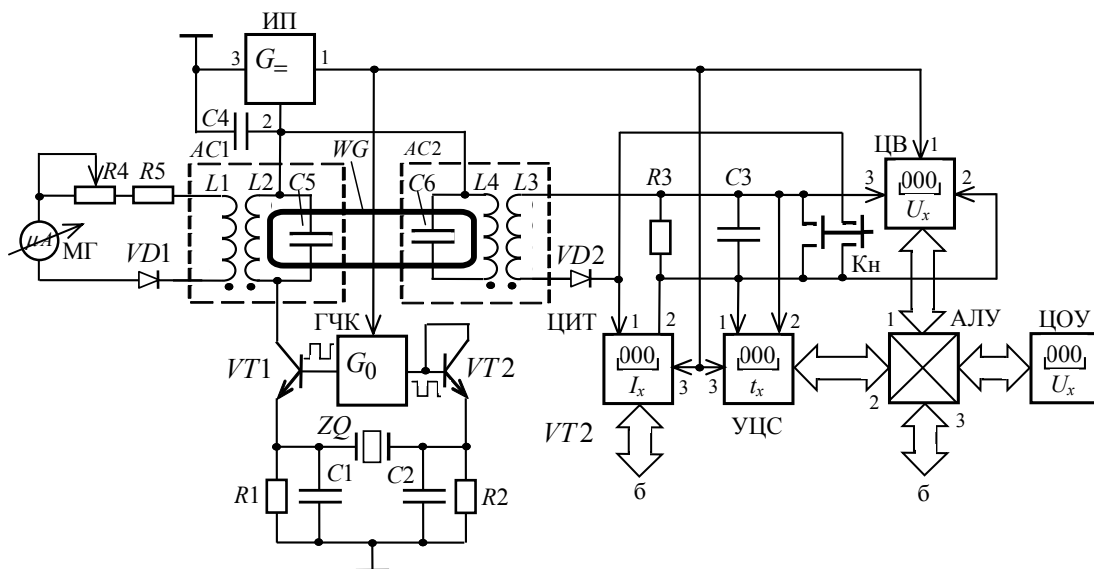


Рис. 6. Структурно-функциональная схема автоматизированного устройства для измерения энергетического уровня Ферми

Измерение времени и скорости переходного процесса является важной характеристикой свойств материала, поскольку по ним можно оценить энергию частиц приповерхностного слоя материала, время и скорость ее изменения (компенсации).

За счет емкостной связи катушек $L2$ и $L4$ через волновод WG и их непосредственной гальванической связи через второй вывод источник питания ИП, в катушке индуктивности $L4$ генерируется ЭДС в виде высокочастотного напряжения той же частоты, пропорциональное энергетическому уровню Ферми. Это высокочастотное напряжение трансформируется на выход катушки индуктивности $L3$ с заданным коэффициентом трансформации k_T .

Сигнал $u'_{FL}(t)$ на выходе второй катушки индуктивности $L3$ описывается уравнением величин (6). Полученное переменное напряжение выпрямляется, усредняется благодаря RC -нагрузки и измеряется с помощью цифрового вольтметра ЦВ. Полученное значение напряжения U_{cp} (7) запоминается и в виде соответствующего кода числа поступает в АЛУ. Одновременно измеряются токи i_{x1} и i_{x2} и соответствующие падения напряжений u_{x1} и u_{x2} на RC -нагрузке (см. рис. 6, $R3$ и $C3$) в фиксированный моменты времени t_{x1} ($t_{x1} = \Delta t_0 \leq T_k$) и в момент времени t_{x2} ($t_{x1} > T'_k$). В указанные моменты времени на отсчетном устройстве ЦВ появляются, соответственно, первое значения постоянного напряжения U_{x1} , пропорционального энергии приповерхностного слоя заряженных частиц, и второе, конечное, значение средневыпрямленного напряжения U_{x2} . Причем напряжение U_{x2} фиксируется в момент времени, при котором заряд (или напряжение), накопленный конденсатором $C3$, достигнет максимального значения, при котором значение напряжения на нем будет отличаться от предыдущего значения с априори заданной погрешностью δ_0 , т.е. $\Delta U_x = U_{x2}'' - U_{x2} \leq \delta_0$. Измеренные значения времени t_{x1} и t_{x2} , токов I_{x1} и I_{x2} и напряжений U_{x1} (при $t_{x1} \leq T_k$) и U_{x2} (при $t_{x1} > T'_k$ и $\Delta U_0 \leq \delta_0$) запоминаются и в определенные моменты времени поступают в АЛУ.

Результаты измерений токов, напряжений и интервалов времени поступают на цифровые входы арифметико-логического устройства АЛУ. По определенной программе, с помощью АЛУ осуществляется вычисление указанных энергий.

Значение энергетического уровня приповерхностного слоя заряженных частиц вычисляется по уравнению измерений

$$E_{nc} = s_0 U_{x1} I_{x1} t_{x1} = s_0 t_{x1} U_{x1}^2 / R_n \text{ эВ}, \quad (11)$$

где $s_0 = 1 \text{ эВ} / 1,602176565 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} \cong 0,624 \cdot 10^{19} \text{ эВ/Дж}$ — крутизна преобразования.

Значение суммарной энергии материала волновода и его приповерхностного слоя определяется по уравнению измерений

$$E_{\Sigma} = s_0 U_{x2} I_{x2} t_{x2} = s_0 t_{x2} U_{x2}^2 / R_n \text{ эВ}, \quad (12)$$

Значение энергетического уровня Ферми исследуемого материала определяется по уравнению измерений

$$E_{FL} = s_0 (U_{x2} I_{x2} t_{x2} - U_{x1} I_{x1} t_{x1}) = s_0 (U_{x2}^2 t_{x2} - U_{x1}^2 t_{x1}) / R_n \text{ эВ}. \quad (13)$$

Полученные результаты отображаются на экране цифрового отсчетного устройства ЦОУ.

Для проведения повторных измерений используется кнопка Кн «сброс» показаний. При ее нажатии

разряжается конденсатор С3 и замыкаются входы цифрового измерителя тока ЦИТ (см. рис. 6). Поскольку $\{t_{x1}\} \ll \{t_{x2}\}$, то на практике значением энергетического уровня (11) приповерхностного слоя заряженных частиц пренебрегают.

Таким образом, описан процесс измерений и приведены соответствующие уравнения величин для случая, когда результаты измерений, при нормальных условиях выполнения измерений, характеризуют только тот материал волновода, который используется в устройстве, — без общения и без приведения результатов измерений к единице площади и объема материала волновода.

3.3. Магнитополовой измеритель уровня и энергии Ферми. Ниже, на рис. 7, приведена структурно-функциональная схема магнитополового измерителя как энергетического уровня Ферми, так и энергии Ферми. Отличие ее от структурно-функциональной схемы, приведенной на рис. 4, состоит в том, что, как было сказано выше, для измерения энергии Ферми материалов в устройство дополнительно введен измеритель действующего значения высокочастотного тока, обусловленного сложным (колебательно-вращательно-поступательным) движением электронов по замкнутому контуру волновода. Второе отличие состоит в исключении конденсаторов С5 и С6, т.е. в использовании только собственных емкостей контуров. Это позволяет повысить чувствительность измерений и изменять частоту тока в широком диапазоне значений.

По результатам измерения действующего значения высокочастотного тока ($I_{вч}$) значение энергии Ферми определяется по уравнению величин (9) или по уравнению числовых значений (при $l_0 = 1\text{ м}$, $V_0 = 1\text{ м}^3$ и $t_x = 1\text{ с}$):

$$E_F = \{s_{пр}\} \frac{\{I_0\} \{V_0\}}{\{I_x\} \{V_x\}} \{U_x\} \{I_{вч}\} \{t_x\} \text{ Дж} = \frac{\{s'_{пр}\}}{\{I_x\} \{V_x\}} \{U_x\} \{I_{вч}\} \{t_x\} \text{ Дж} = \{s''_{пр}\} \{U_x\} \{I_{вч}\} \{t_x\} \text{ Дж} . \quad (14)$$

где $\{S''_{пр}\}$ — числовое значение крутизны преобразования; $\{S'_{пр}\} = \{S_{пр}\} / \{I_x\} \{V_x\}$ при $l_0 = 1\text{ м}$ и $V_0 = 1\text{ м}^3$.

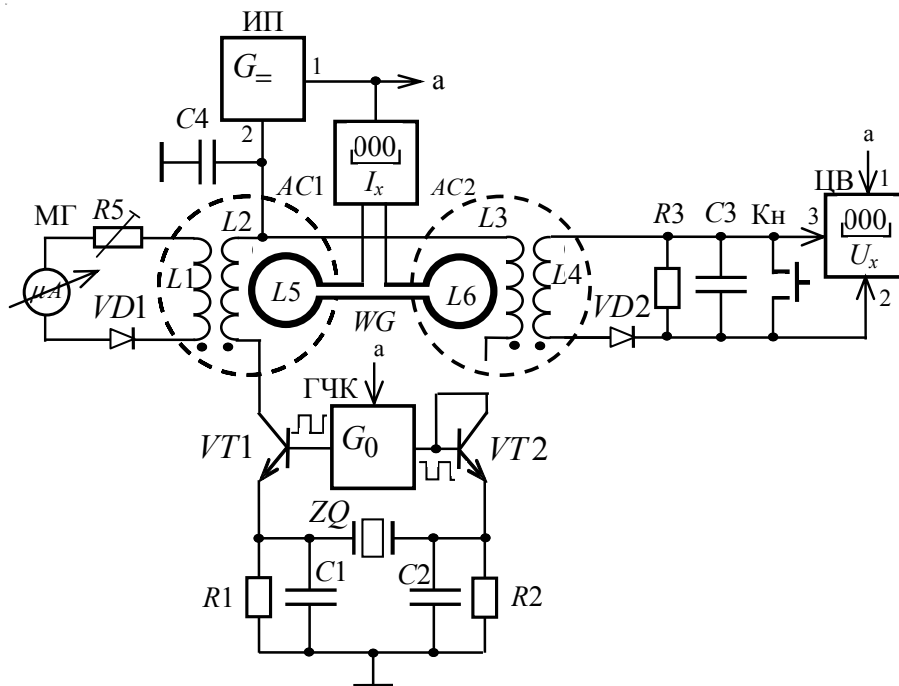


Рис. 7. Структурно-функциональная схема магнитополового измерителя уровня и энергии Ферми

Определение действующего значения энергетического уровня Ферми осуществляется согласно уравнению числовых значений (8).

В табл. 1 приведены результаты измерений параметров волновода, изготовленного из разных материалов, времени усреднения выходного напряжения и самого напряжения.

Зависимость выходного напряжения магнитополового измерителя от типа материала приведена на рис. 8.

Как видно из рис. 8, уровни выходных напряжений для металлов и диэлектриков (см., например, пару материалов «медь – пропилен»), существенно различаются между собой. Исследования показали, что и толщина материала, из которого выполнен волновод, также влияет на результат измерений. Некоторую аномалию в результат измерений вносит двухсторонний стеклотекстолит фольгированный. Можно сделать вывод, что соленоидальное импульсное магнитное поле приводит в движение и воздействует на электроны

как медной фольги, так и стеклотекстолита, обуславливая суммарный эффект по выходному напряжению.

Таблица 1

Результаты измерений параметров волновода, изготовленного из разных материалов, времени усреднения выходного напряжения и самого напряжения

Результаты измерений								
№ п/п	Материал*	Параметры						
		Толщина $h_{вх}$, мм	Площадь S_x , мм ²	Объем, V_x , мм ³	Длина пути l_x , мм	Сопротивление R_n , Ом	Время усреднения, t_x , с	Напряжение U_x , В
1	Медь, образец 1	2,5	750	1875	138	10^4	1	0,98
2	Медь, образец 2	0,5	750	375	138	10^4	1	0,9
3	Алюминий	0,7	750	525	138	10^4	1	0,96
4	Свинец	2,5	750	1875	138	10^4	1	0,65
5	Стеклотекстолит фольгированный двухсторонний	0,2	750	150	138	10^4	1	0,64
6	Полипропилен	2,1	750	1725	138	10^4	1	0,4

При измерениях особую роль играют переходные процессы, несущие полезную информацию об индивидуальных свойствах исследуемом материале. Как видно из приведенных графиков (см. рис. 8), для каждого образца исследуемого материала присущи свои параметры переходных процессов, изучение которых является самостоятельной научно-технической задачей. Только по истечении 5-и ... 20-и секунд показания прибора

До указанных моментов времени происходит, по-нашему мнению, процесс «очистения» материала от приповерхностного слоя заряженных частиц и процесс достижения электронами стационарности непрерывного движения по замкнутому контуру волновода. Показания ЦВ устанавливаются и не изменяются в течение всего времени наблюдений процесса измерений (см. рис. 8).

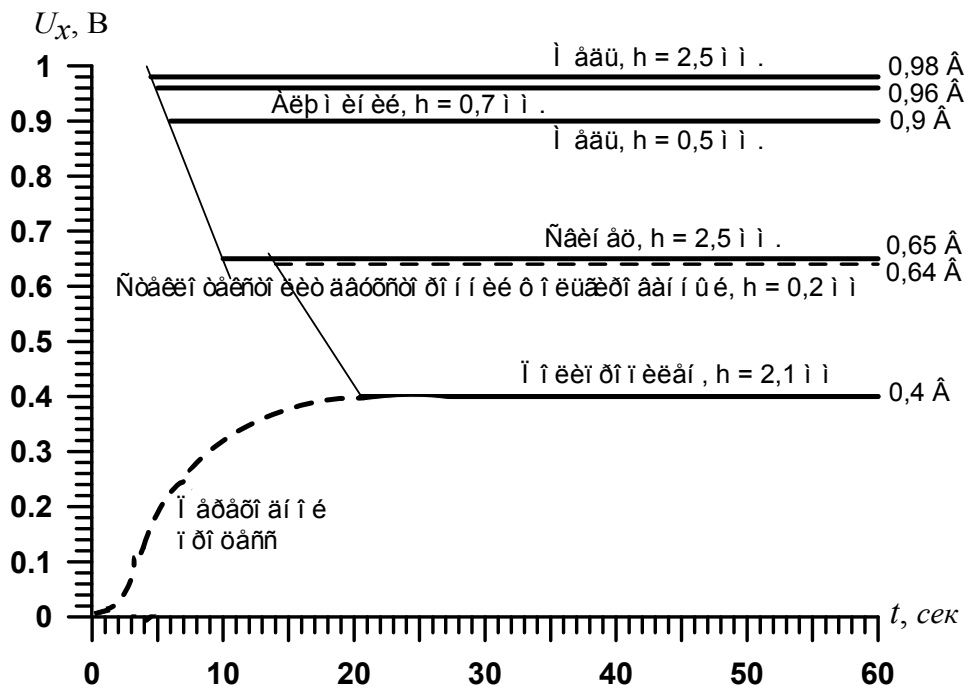


Рис. 8. Зависимость уровня выходного напряжения от типа материала и его толщины

В табл. 2 приведены результаты расчетов энергетического уровня Ферми для ряда материалов при выбранной линейной модели (8) и $\{s'_{пр}\} = 6$. Приведенные данные являются оценочными, поскольку, как было отмечено выше, еще не разработана методика калибровки магнитопольных измерителей и измерительных преобразователей, а также отсутствует методика изготовления волноводов с заданными параметрами. Расчеты энергии Ферми не приводятся ввиду отсутствия результатов измерения тока $I_{вч}$, значения крутизны преобразования $s''_{пр}$ и методики калибровки. На решения этих задач и будут направлены усилия ученых и разработчиков магнитопольных измерителей уровня и энергии Ферми.

Таблица 2

Результаты расчетов энергетического уровня Ферми для ряда материалов при выбранной линейной модели

Результаты вычислений уровней и энергий при линейной модели				
№ п/п	Параметры Материал	Напряжение U_x , В	Энергетический уровень Ферми E_{FL} , эВ (при $l_0=1\text{м}$, $V_0=1\text{м}^2$)	Энергия Ферми материала E_F , Дж (при $l_0=1\text{м}$, $S_0=1\text{м}^3$)
1	Медь, образец 1	0,98	5,568	Нет данных о $I_{вч}$
2	Медь, образец 2	0,9	4,695	Нет данных о $I_{вч}$
3	Алюминий	0,96	5,34	Нет данных о $I_{вч}$
4	Свинец	0,65	2,448	Нет данных о $I_{вч}$
5	Стеклотекстолит фольгированный двухсторонний	0,64	2,376	Нет данных о $I_{вч}$
6	Полипропилен	0,4	0,924	Нет данных о $I_{вч}$

3.4. Магнитополовой автоматический измеритель уровня и энергии Ферми

Для осуществления автоматических измерений уровня и энергии Ферми предложено усовершенствовать техническое решение магнитополового измерителя, приведенного на рис. 4, и дополнительно ввести в него микроконтроллер МК, отсчетно-регистрирующее устройство ОРУ, клавиатуру Кл и делитель частоты ДЧ, соединенные между собой и с другими функциональными блоками, как показано на рис 9. В этом магнитполовом измерителе для формирования высокочастотного тока (типа меандр) используется внутренний кварцевый генератор высокой частоты. Необходимое значение частоты сигнала формируется по программе, записанной в память микроконтроллера МК. С помощью делителя частоты ДЧ на два осуществляется сигнал требуемой формы. Усиление по току достигается за счет работы транзистора VT в ключевом режиме и установкой соответствующего напряжения питания на втором выходе источника питания ИП, к которому подключен, через катушку индуктивности L2, коллектор транзистора VT.

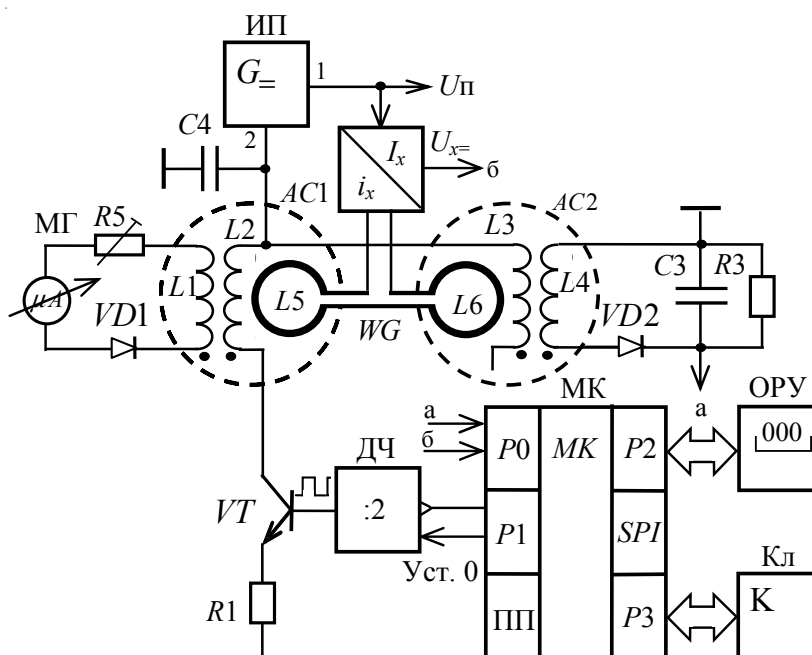


Рис. 9. Цифровой измеритель уровня и энергии Ферми

В целом процесс измерений осуществляется по команде, записанной в постоянную память микроконтроллера МК. Все данные по измеренным параметрам волновода и значениям сопротивления резистора и емкости конденсатора RC –нагрузки априори заносятся в память МК с помощью клавиатуры Кл. Полностью автоматизировать процесс измерений пока не удастся в связи с ручной заменой и установкой волновода WG.

Таким образом, приведенные методы и магнитополовые измерители обеспечивают решение поставленной технической задачи.

Выводы. Впервые в мире остро поставлен вопрос о различении понятий «уровень Ферми» и «энергия Ферми» и их единиц измерений в системе СИ.

Необходимость развития магнитопольных методов измерений уровня и энергии Ферми не вызывает сомнения ввиду важности указанных величин при оценке и сравнении качества материалов.

Развитие магнитопольной теории измерений обуславливает необходимость разработки нормативных документов и единых требований к нормируемым параметрам, форме и технологии изготовления волноводов из образцов исследуемых материалов.

Подробно описана сущность методов измерения уровня и энергии Ферми, показаны их различия. Впервые в мире приведены уравнения связи между физическими величинами, измеряемыми при определении энергетического уровня Ферми и энергии Ферми материалов.

Предложены уравнения измерений энергетического уровня Ферми и энергии Ферми материалов при нормальных условиях проведения измерений, учитывающие не частные размеры волноводов, а размеры, приведенные к единицам измерений в СИ.

Впервые в мире разработаны технические решения магнитопольных измерителей уровня и энергии Ферми, защищенные патентами Украины, описана их работа, отличия и особенности реализации.

Наибольший интерес представляют магнитопольные измерители уровня и энергии Ферми на микроконтроллерах или на микроконверторах. Они обеспечивают наибольший уровень автоматизации процесса измерений и высокую точность измерений.

Приведенные результаты экспериментальных исследований подтверждают основные положения магнитопольной теории измерений и сущность физических процессов, протекающих в материале при воздействии на его соленоидальным импульсным магнитным полем высокой частоты.

Полученные результаты расширяют наши представления о магнитопольных методах и средствах измерений уровня и энергии Ферми при нормальных условиях проведения этих измерений.

Особое внимание следует обратить на проведение всего объема экспериментальных исследований с использованием предложенных технических решений магнитопольных измерителей уровня и энергии Ферми и на уточнение используемых моделей.

Литература

1. Кондратов В.Т. Магнитопольный эффект / В.Т. Кондратов // Матеріали 17-ї МНТК Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах», 8–13 червня 2017 р., м. Одеса (Затока). – 2017. – С. 64–67.
2. Кондратов В.Т. Фундаментальная метрология: проблема измерения энергии Ферми / В.Т. Кондратов // Тезисы докладов 16-й междунар. науч.-техн. конф. «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах» (ВОТТП-15 2016), м. Одеса (Затока), 10–15 червня. — С. 27–30.
3. Кондратов В.Т. Фундаментальная метрология: проблема измерения энергии Ферми / В.Т. Кондратов // Тезисы докладов 16-й междунар. науч.-техн. конф. «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах» (ВОТТП-15 2016), м. Одеса (Затока), 10–15 червня. – С. 27–30.
4. Кондратов В.Т. Фундаментальная метрология. Магнитопольная 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.
5. Кондратов В.Т. Фундаментальная метрология. Магнитопольная теория измерений с использованием явления переноса энергии и информации сквозь материал или вещество. Часть 2. Атрибуты магнитопольных эффектов / В.Т. Кондратов // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. — 2018. — № 1. — С. 7–14.
6. Кондратов В.Т. Фундаментальная метрология. Магнитопольная теория измерений с использованием явления переноса энергии и информации сквозь материал или вещество. Часть 2.1. Условия проявления магнитопольных эффектов и явлений / В.Т. Кондратов // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. — 2018. — № 1. — С. 15–31.
7. Кондратов В.Т. Фундаментальная метрология. Магнитопольная теория измерений с использованием явления переноса энергии и информации сквозь материал или вещество. Часть 3. Явление переноса, используемые фундаментальные законы, условия и проблемы измерений / В.Т. Кондратов // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2018. – № 5. – С. 165–178.
8. Кондратов В.Т. Фундаментальная метрология. Магнитопольная теория измерений с использованием явления переноса энергии и информации сквозь материал или вещество. Часть 4. Магнитопольные методы и измерительные преобразователи / В.Т. Кондратов // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2018. – № 6. – С. 183–197.
9. Кондратов В.Т. Фундаментальная метрология. Магнитопольная теория измерений с использованием явления переноса энергии и информации сквозь материал или вещество. Часть 5. Физические эффекты и методы измерения энергии Ферми / В.Т. Кондратов // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2019. – № 1. – С. 220–231.
10. Патент України на винахід № 115190. Спосіб вимірювального перетворення фізичних величин та пристрій для його здійснення / Кондратов В.Т. – Бюл. № 7, 10.04.2017.
11. Патент України на винахід № 117538. Спосіб магнітопольного перетворення енергії негативно

заряджених квазічастинок матеріалу (речовини) або дискретних енергетичних рівнів Ландау у напругу і в адекватну енергію радіоімпульса / Кондратов В.Т. – Бюл. № 15, 10.08.2018.

12. Патент України на винахід № 117759. Спосіб визначення внутрішньої енергії Фермі простих речовин та пристрій для його здійснення / Кондратов В.Т., Чернецкий В.В. – Бюл. № 18, 25.09.2018.

13. Ферми-енергия [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://femto.com.ua/articles/part_2/4302.html

14. Энергия Ферми [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://www.google.com/search?client=firefox-b&ei=VlSkXJ7iMfKhrqTewbfQDg&q=%D1%8D%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B3%D0%B8%D1%8F+%D1%84%D0%B5%D1%80%D0%BC%D0%B8&oq=%D1%8D%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B3%D0%B8%D1%8F+%D0%A4%D0%B5%D1%80%D0%BC%D0%B8&gs_l=psy-ab.1.0.0i6712j0i7130j0i67j0i6.18110.18110..20868..0.0.0.94.94.1.....0....1.gws-wiz.....0i71.f_1--oNWRcI

15. Уровень Ферми [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://sites.google.com/site/kolloidnaahimia/adsorbciavsvistat-vseh-na-poverhnost/chemisorption/level_fermi

16. Как образуются свободные электроны [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://etherdynamics.wiki/wiki/%D0%9A%D0%B0%D0%BA_%D0%BE%D0%B1%D1%80%D0%B0%D0%B7%D1%83%D1%8E%D1%82%D1%81%D1%8F_%D1%81%D0%B2%D0%BE%D0%B1%D0%BE%D0%B4%D0%BD%D1%8B%D0%B5_%D1%8D%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BD%D1%8B

References

1. Kondratov V.T. Magnitopolevoj effekt / V.T. Kondratov // *Materiali 17-yi MNTK Vimiryuvalna ta obchislyuvalna tehnika v tehnologichnih procesah*, 8–13 chervnya 2017 r., m. Odesa (Zatoka). – 2017. – S. 64–67.

2. Kondratov V.T. Fundamentalnaya setrologii: problema izmereniya energii Fermi / V.T. Kondratov // *Tezisy dokladov 16-j mezhdunar. nauch.-tehn. konf. «Vimiryuvalna ta obchislyuvalna tehnika v tehnologichnih procesah» (VOTTP-15 2016)*, m. Odesa (Zatoka), 10–15 chervnya. — S. 27–30.

3. Kondratov V.T. Fundamentalnaya metrologiya: problema izmereniya energii Fermi / V.T. Kondratov // *Tezisy dokladov 16-j mezhdunar. nauch.-tehn. konf. «Vimiryuvalna ta obchislyuvalna tehnika v tehnologichnih procesah» (VOTTP-15 2016)*, m. Odesa (Zatoka), 10–15 chervnya. — S. 27–30.

4. Kondratov V.T. Fundamentalnaya metrologiya. Magnitopolevaya teoriya izmerenij s ispolzovaniem yavleniya perenosa energii i informacii skvoz material ili veshstvo. Chast 1. Filosofskie aspekty teorii / V.T. Kondratov // *Herald of Khmelnytskyi National University*. – 2018. – № 4. – S. 222–233.

5. Kondratov V.T. Fundamentalnaya metrologiya. Magnitopolevaya teoriya izmerenij s ispolzovaniem yavleniya perenosa energii i informacii skvoz material ili veshstvo. Chast 2. Atributy magnitopolevyh effektov / V.T. Kondratov // *Vimiryuvalna ta obchislyuvalna tehnika v tehnologichnih procesah*. — 2018. — № 1. — S. 7 – 14.

6. Kondratov V.T. Fundamentalnaya metrologiya. Magnitopolevaya teoriya izmerenij s ispolzovaniem yavleniya perenosa energii i informacii skvoz material ili veshstvo. Chast 2.1. Usloviya proyavleniya magnitopolevyh effektov i yavlenij / V.T. Kondratov // *Vimiryuvalna ta obchislyuvalna tehnika v tehnologichnih procesah*. — 2018. — № 1. — S. 15–31.

7. Kondratov V.T. Fundamentalnaya metrologiya. Magnitopolevaya teoriya izmerenij s ispolzovaniem yavleniya perenosa energii i informacii skvoz material ili veshstvo. Chast 3. Yavlenie perenosa, ispolzuemye fundamentalnye zakony, usloviya i problemy izmerenij / V.T. Kondratov // *Herald of Khmelnytskyi National University*. – 2018. – № 5. – S. 165–178.

8. Kondratov V.T. Fundamentalnaya metrologiya. Magnitopolevaya teoriya izmerenij s ispolzovaniem yavleniya perenosa energii i informacii skvoz material ili veshstvo. Chast 4. Magnitopolevye metody i izmeritelnye preobrazovateli / V.T. Kondratov // *Herald of Khmelnytskyi National University*. – 2018. – № 6. – S. 183–197.

9. Kondratov V.T. Fundamentalnaya metrologiya. Magnitopolevaya teoriya izmerenij s ispolzovaniem yavleniya perenosa energii i informacii skvoz material ili veshstvo. Chast 5. Fizicheskie efekty i metody izmereniya energii Fermi / V.T. Kondratov // *Herald of Khmelnytskyi National University*. – 2019. – № 1. – S. 220–231.

10. Patent Ukrayini na vinahid № 115190. Sposib vimiryuvalnogo peretvorenniya fizichnih velichin ta pristrij dlya jogo zdijsnennya / Kondratov V.T. – Бюл. № 7, 10.04.2017.

11. Patent Ukrayini na vinahid № 117538. Sposib magnitopolevogo peretvorenniya energiyi negativno zaryadzenih kvazichastinok materialu (rečovini) або дискретних енергетичних рівнів Ландау у напругу і в адекватну енергію радіоімпульса / Кондратов В.Т. – Бюл. № 15, 10.08.2018.

12. Patent Ukrayini na vinahid № 117759. Sposib viznachennya vnutrishnoyi energiyi Fermi prostih rečovin ta pristrij dlya jogo zdijsnennya / Kondratov V.T., Чернецкий В.В. – Бюл. № 18, 25.09.2018.

13. Ферми-енергия [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://femto.com.ua/articles/part_2/4302.html

14. Energiya Fermi [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : https://www.google.com/search?client=firefox-b&ei=VlSkXJ7iMfKhrqTewbfQDg&q=%D1%8D%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B3%D0%B8%D1%8F+%D1%84%D0%B5%D1%80%D0%BC%D0%B8&oq=%D1%8D%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B3%D0%B8%D1%8F+%D0%A4%D0%B5%D1%80%D0%BC%D0%B8&gs_l=psy-ab.1.0.0i6712j0i7130j0i67j0i6.18110.18110..20868..0.0.0.94.94.1.....0....1.gws-wiz.....0i71.f_1--oNWRcI

15. Uroven Fermi [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : https://sites.google.com/site/kolloidnaahimia/adsorbciavsvistat-vseh-na-poverhnost/chemisorption/level_fermi

16. Kak obrazuyutsya svobodnye elektrony [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : https://etherdynamics.wiki/wiki/%D0%9A%D0%B0%D0%BA_%D0%BE%D0%B1%D1%80%D0%B0%D0%B7%D1%83%D1%8E%D1%82%D1%81%D1%8F_%D1%81%D0%B2%D0%BE%D0%B1%D0%BE%D0%B4%D0%BD%D1%8B%D0%B5_%D1%8D%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BD%D1%8B

Рецензія/Peer review : 12.5.2019 р.

Надрукована/Printed : 2.6.2019 р.

Прорецензовано редакційною колегією

Й.Й. БІЛИНСЬКИЙ, О.С. ГОРОДЕЦЬКА, Д.В. НОВИЦЬКИЙ
Вінницький національний технічний університет

РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ХВИЛЕВОДНОГО НВЧ ВИМІРЮВАЛЬНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ ВОЛОГОСТІ ПРИРОДНОГО ГАЗУ

В статті розроблено математичну модель НВЧ вимірювального перетворення вологості природного газу шляхом використання біжучої хвилі на основі хвильового методу, запропоновано структурну схему вимірювального перетворювача вологості природного газу, описано принцип його роботи.

Ключові слова: вологість, природний газ, надвисокочастотний хвильовий метод, біжуча хвиля.

Y.Y. BILYNSKY, O.S. HORODETSKA, D.V. NOVYTSKYI
Vinnitsia National Technical University

DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL OF THE WAVEGUIDE MICROWAVE MEASURING CONVERSION THE HUMIDITY OF NATURAL GAS

The purpose of the article is to improve the accuracy of measuring the conversion of the humidity of natural gas by using the microwave waveguide method. In the article a reasonable analysis of the choice of the waveguide microwave method of measuring the humidity of natural gas has been made. In contrast to the known methods, the use of a traveling wave in a waveguide has been proposed, and changes in the dielectric properties of gases when they interact with the microwave waves are estimated. A mathematical model for the microwave measuring conversion of the humidity of natural gas has been proposed, the meaning of which is to absorb the microwave signal and, consequently, measure the power of this signal at the output of the waveguide when the humidity of the gas changes by using a traveling wave. In the article also the dependence of the power of a traveling wave on the absolute humidity of water vapour at various values of the passage of the microwave signal in a humid environment, taking into account temperature and pressure has been investigated. A structural scheme of a microwave measuring transducer of humidity of natural gas has been proposed, the principle of its operation has been described. The research results suggest that it is promising for practical application of measuring the moisture of natural gas devices using tools based on the microwave traveling wave method.

Keywords: humidity, natural gas, microwave waveguide method, traveling wave.

Вступ

Однією з найважливіших задач під час транспортування природного газу є оцінка його якості, під якою розуміють відповідність його складу певним значенням його основних характеристик, таких як теплотворна здатність, вміст вологи та наявність корозійно-активних компонентів (сірководень, вуглекислий газ тощо). Найбільш вагомими є домішки води, присутність якої в газі небажана, оскільки при транспортуванні газу можуть спостерігатися випадки корозії трубопроводів і арматури, а також утворення гідратів (продуктів приєднання води до різних речовин) та конденсату. Умови транспортування не потребують повного видалення вологи з природного газу, а вимагають лише підтримки необхідної температури точки роси вологи та вуглеводнів, що не переводить газ, при зниженні його температури, з ненасиченого стану в насичений, при якому можливе виділення конденсованої фази з його складу [1, 2].

Кількісно вологовміст у газі може характеризуватися різними фізичними величинами, серед яких найбільш широко розповсюдженими є абсолютна вологість, молярна (об'ємна) частка вологи, об'ємний вологовміст, температура точки роси, відносна вологість.

На сьогодні чинним в Україні документом, який містить санітарно-гігієнічні вимоги та вимоги безпеки, є міждержавний ГОСТ [3]. Особливе місце в нормативному забезпеченні займають науково обґрунтовані норми для значень якісних показників газу. В технічних умовах на газ, що подається з родовищ, газопереробних заводів та підземних сховищ України до магістральних газопроводів ТУ У 11.1-20077720-001:2010 встановлені такі вимоги щодо вологості газу: для об'єктів, що подають газ до газопроводів-відводів з робочим тиском понад 2,45 МПа (відводи магістральних газопроводів I класу) температура точки роси має становити:

- не вище мінус 5 ° (при 3,92 МПа) з 1 жовтня по 30 квітня (зимовий період);
 - не вище мінус 3 °С (при 3,92 МПа) з 1 травня по 30 жовтня (літній період);
- для об'єктів, що подають газ до магістральних газопроводів II класу:
- мінус 5 °С (при 2,45 МПа) з 1 жовтня по 30 квітня;
 - 0 °С (при 2,45 МПа) з 1 травня по 31 травня і з 1 вересня по 31 жовтня);
 - плюс 5 °С (при 2,45 МПа) з 1 червня по 31 серпня.

Існує багато методів і засобів визначення вологості. Найбільш розповсюдженим методом є конденсаційний, який має ряд обмежень. А саме метод застосовується для визначення температури точки роси вологи в газах, що не містять крапельної рідини і точка роси вуглеводнів яких не перевищує точки роси вологи більше, ніж на 5°C. Крім того, температура на пробовідбірній лінії повинна бути не менше, ніж на 3°C вище ймовірної (очікуваної) температури точки роси газу. При недотриманні вище вказаних вимог суттєво зростає похибка вимірювання. Дані обмеження відсутні в надвисокочастотному методі вимірювання вологості природного газу.

Метою роботи є підвищення точності вимірювального перетворення шляхом використання НВЧ

хвилеводного методу біжучої хвилі.

Матеріали та результати досліджень. Вимірювання вологості газів на НВЧ є різновидом діелекметричного методу, в якому зміна діелектричних властивостей газів оцінюється за їх взаємодією з радіохвилями дециметрового, сантиметрового та міліметрового діапазонів. Згідно з прийнятою класифікацією методи НВЧ вологометрії поділяються на оптичні, резонансні, хвилеводні, биття, зондові тощо [2, 4, 5].

Оптичні методи чи методи вільного простору, в свою чергу, поділяються на такі, що використовують хвилі проходження та відбиваючі хвилі. В цих модифікаціях вимірюваною характеристикою може бути затухання, зміна амплітуди чи фази хвилі [1].

Для резонансних методів характерне використання двох резонаторів: вимірювального та опорного. Для отримання точних результатів необхідно, щоб частота опорного резонатора залишалась незмінною на протязі всього часу, необхідного для вимірювань. При вимірюванні діелектричної проникності вологий газ продувається через резонатор і вимірюється відносний зсув частоти резонатора, заповненого паром, порівняно з частотою резонатора, заповненого сухим газом. На основі вимірювань, отриманих для певного вмісту вологи в газі, можуть бути проведені розрахунки діелектричної проникності газу при іншому відсотковому вмісті вологи. Ці розрахунки проводяться за допомогою ентропійних діаграм, що ускладнює обробку результатів вимірювання і є суттєвим недоліком [4].

В методі биття порівнюються резонансні частоти двох генераторів. Перший генератор є опорним і працює на фіксованій частоті, а в коливальний контур другого генератора включається еталонний змінний конденсатор. Коливання від двох генераторів подаються на змішувач, що дозволяє отримати різницеву частоту (биття), яка реєструється вихідним індикатором. Змінюючи частоту генератора, домагаються рівності частот (нульові биття). Після отримання нульового биття паралельно до еталонного конденсатора підключається вимірювальний конденсатор з досліджуваною речовиною. Діелектрична проникність визначається через різницю значень ємності еталонного конденсатора до підключення вимірювального конденсатора, його ємності після підключення і ємності вимірювального конденсатора. Недоліком такого методу є складне схемотехнічне рішення [5].

Хвилеводний метод полягає в тому, що в хвилеводній лінії передачі за допомогою генератора НВЧ на довжині хвилі генератора, збуджують основну хвилю і встановлюють в лінії передачі режим стоячих хвиль. Перед вимірюванням хвилеводна комірка відкачується і на вимірювальній лінії знаходиться положення вузла стоячої хвилі. Потім в хвилеводну комірку вводять досліджуваний газ, що викликає зміщення мінімуму стоячої хвилі. Зміщення вузла стоячої хвилі дозволяє визначити діелектричну проникність досліджуваного газу за відомою довжиною хвилі в хвилеводі та довжиною хвилі у вільному просторі. Недоліком такого методу є великі розміри хвилеводної комірки [2, 5].

В роботі запропоновано математична модель НВЧ вимірювального перетворення вологості природного газу, суть якого полягає у поглинанні НВЧ сигналу, а отже вимірюванні потужності даного сигналу на виході хвилеводу при зміні вологості газу шляхом використання біжучої хвилі.

Поведінка діелектрика в синусоїдальному електромагнітному полі характеризується макроскопічними величинами комплексних діелектричної ϵ^* і магнітної μ^* проникностями. У вологих матеріалів, що не містять ферромагнетиків, величина $\mu^* \approx \mu_0$ (магнітної проникності пустоти) і їх електричні властивості в слабких змінних електричних полях можна описати двома параметрами, пов'язаними з ϵ^* такими, як дійсна ϵ' і уявна ϵ'' складові комплексної діелектричної проникності через $\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon''$.

Сучасна фізика діелектриків пов'язує залежність ϵ і $\text{tg}\delta$ матеріалів від їх властивостей з основними процесом, що відбувається в будь-якому реальному діелектрику під впливом електричного поля, – поляризацією частинок діелектрика.

В гетерогенних системах поляризація має неоднаковий характер для різних фаз і для всієї системи в цілому. На характеристики системи здійснює також вплив подвійний електричний шар, обумовлений наявністю заряду на поверхні поділу між фазами, що мають різні електричні властивості (ϵ і σ).

Залежність між цими величинами має вигляд [2]:

$$\epsilon'' = \epsilon'; \quad \epsilon'' = \frac{\sigma}{\omega}; \quad \text{tg} \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} = \frac{\sigma}{\omega\epsilon}; \quad \epsilon^* = \epsilon(1 - j\text{tg}\delta) \quad (1)$$

де ω – кутова частота;

$\text{tg}\delta$ – тангенс кута діелектричних втрат.

За Дебаєм частотна залежність діелектричної проникності при релаксаційному поглинанні описується рівняннями [2]:

$$\epsilon^* - \epsilon_\infty = \frac{\epsilon_0 - \epsilon_\infty}{1 + j\omega\tau}, \quad (2)$$

Звідки

$$\varepsilon^* = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty}{1 + j\omega^2\tau^2}, \quad (3)$$

і

$$\varepsilon'' = (\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty) = \frac{\omega\tau}{1 + \omega^2\tau^2}, \quad (4)$$

З (4) можна визначити максимальне значення ε'' :

$$\varepsilon''_{\text{макс}} = \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty}{2}. \quad (5)$$

Вихідною величиною вимірювального перетворення, що базується на проходженні електромагнітної хвилі по хвилеводу у вільному середовищі, слугує ослаблення.

Потужність випромінювання затухає в результаті проходження біжучої хвилі по хвилеводу за законом [2, 5]:

$$P = P_0 \cdot e^{-\alpha l}, \quad (6)$$

де P_0 – вхідна потужність, що поширюється хвилеводом;
 l – довжина проходження НВЧ сигналу в досліджуваному середовищі;
 α – загальний коефіцієнт поглинання, що дорівнює

$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2, \quad (7)$$

де α_1 – коефіцієнт поглинання для водяної пари;
 α_2 – коефіцієнт поглинання для природного газу.

Оскільки вимірювання діелектричної проникності газів повинно забезпечувати значення шостого знаку після коми, що відповідає точності порядку $10^{-4}\%$ для величини ε' або 1-2% для величини $\varepsilon' - 1$, то величина $\varepsilon' - 1$ вимірюється з похибкою, яку можна експериментально реалізувати. Залежність діелектричної проникності газів від температури та тиску визначається зміною числа молекул в одиниці об'єму газу. При цьому значення діелектричної проникності досліджуваного газу при тиску P і температурі T (в градусах шкали Кельвіна) може бути перераховано до значення ε'_0 при тиску 760 мм рт. ст. і температурі 273,2°К за формулою [5, 6]

$$\varepsilon'_0 - 1 = (\varepsilon' - 1) \frac{760}{p} \frac{T}{273,2} \quad (8)$$

Коефіцієнт поглинання для водяної пари згідно з [2] визначається

$$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{1}{2} (\sqrt{\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2} - \varepsilon'')} \quad (9)$$

З урахуванням $E'_1 = \varepsilon'_0 - 1$ та $E''_1 = \varepsilon''_0 - 1$, отримаємо

$$\alpha_1 = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{1}{2} (\sqrt{E_1'^2 + E_1''^2} - E_1'')}. \quad (10)$$

Діелектрична проникність пропорційна густині водяної пари [7, 8]

$$\frac{\rho_{\varepsilon}}{\rho_{\varepsilon,n}} = \frac{\varepsilon_{\varepsilon}}{\varepsilon_0}, \quad (11)$$

де ρ_{ε} – густина води;
 $\rho_{\varepsilon,n}$ – абсолютна вологість водяної пари;
 $\varepsilon_{\varepsilon}$, ε_0 – діелектрична проникність води та водяної пари.

З (11) випливає, що

$$\varepsilon_0 = \frac{\rho_{\varepsilon,n} \varepsilon_{\varepsilon}}{\rho_{\varepsilon}}. \quad (12)$$

Тоді

$$E'_1 = \frac{\rho_{\varepsilon,n}}{\rho_{\varepsilon}} (\varepsilon'_{\varepsilon} - 1), \quad E''_1 = \frac{\rho_{\varepsilon,n}}{\rho_{\varepsilon}} (\varepsilon''_{\varepsilon} - 1). \quad (13)$$

З урахуванням (8), (9), (13) отримаємо

$$\alpha_1 = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \frac{p \cdot 273,2}{760 \cdot T} \cdot \frac{\rho_{\varepsilon,n}}{\rho_{\varepsilon}} (\sqrt{E_1'^2 + E_1''^2} - E_1'')}. \quad (13)$$

Аналогічно для газу:

$$\alpha_2 = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \frac{p \cdot 273,2}{760 \cdot T} \cdot (\sqrt{E_2'^2 + E_2''^2} - E_2'')} \quad (14)$$

Залежність відношення вхідної до вихідної потужності випромінювання від абсолютної вологості водяної пари наведена на рис. 1 при різних значеннях довжини проходження НВЧ сигналу в досліджуваному середовищі: $l_1=0,12$ м, $l_2=0,15$ м, $l_3=0,21$ м при $p=1$ атм, $T=0$ °С. Як видно з характеристик, із зростанням абсолютної вологості водяної пари потужність випромінювання спадає за експоненційним законом. При цьому із збільшенням довжини проходження НВЧ сигналу в досліджуваному середовищі потужність випромінювання зменшується.

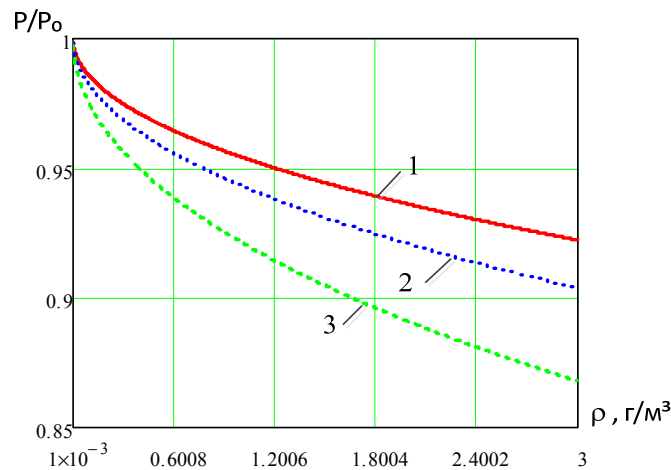


Рис. 1. Залежність відношення вхідної до вихідної потужності випромінювання від абсолютної вологості водяної пари при різних значеннях довжини проходження НВЧ сигналу: 1 – $l_1=0,12$ м, 2 – $l_2=0,15$ м, 3 – $l_3=0,21$ м

На рис. 2 наведена чутливість вимірювального перетворення при різних значеннях довжини проходження НВЧ сигналу в досліджуваному середовищі.

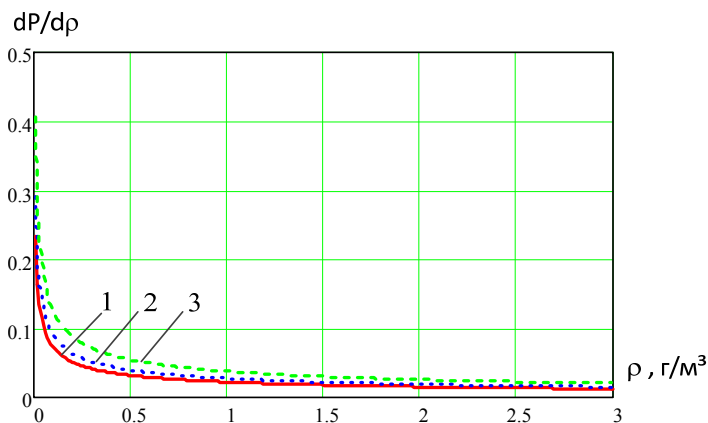


Рис. 2. Чутливість вимірювального перетворення при різних значеннях довжини проходження НВЧ сигналу: 1 – $l_1=0,12$ м, 2 – $l_2=0,15$ м, 3 – $l_3=0,21$ м

Як видно з графіка, поріг чутливості вимірювального перетворення вологості збільшується при збільшенні відстані проходження НВЧ сигналу. Це означає, що при розробці вимірювального перетворювача можна розрахувати необхідну довжину хвильоводного тракту, яка задовольняє задану чутливість при відповідному значенні довжини хвилі електромагнітного випромінювання.

На рис. 3 наведена залежність затухання НВЧ сигналу в результаті проходження через вологий газ при різних значеннях температури: $T_1= -10$ °С, $T_2= 0$ °С, $T_3= +5$ °С, а на рис. 4 – при різних значеннях тиску: $p_1=1$ атм, $p_2=1,5$ атм, $p_3=2$ атм.

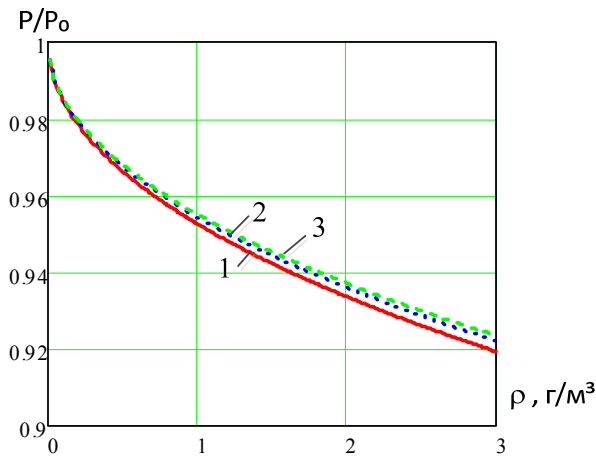


Рис. 3. Залежність потужності випромінювання від вологості при різних значеннях температури: 1 – $T_1 = -10\text{ }^\circ\text{C}$, 2 – $T_2 = 0\text{ }^\circ\text{C}$, 3 – $T_3 = +5\text{ }^\circ\text{C}$

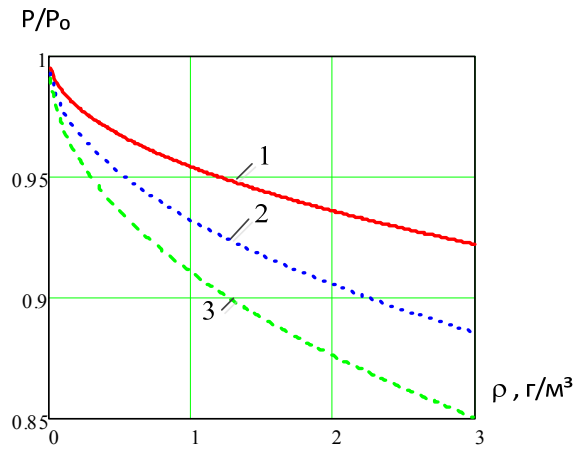


Рис. 4. Залежність потужності випромінювання від вологості при різних значеннях тиску: 1 – $p_1 = 1\text{ атм}$, 2 – $p_2 = 1,5\text{ атм}$, 3 – $p_3 = 2\text{ атм}$

Як видно з графіків максимальна відносна похибка, що вноситься температурою, становить 0,13% при зміні на один градус, а тиском – 0,75% на одну атмосферу. Похибка, що вноситься температурою і тиском, є незначною. Це дає змогу зробити висновок про перспективність використання НВЧ перетворювачів вимірювання вологості природного газу

Таким чином проведені дослідження дозволяють розробити математичну модель вимірювального перетворювача природного газу на основі НВЧ методу біжучої хвилі і, відповідно, вимірювальний перетворювач, структурна схема якого наведена на рис. 5.

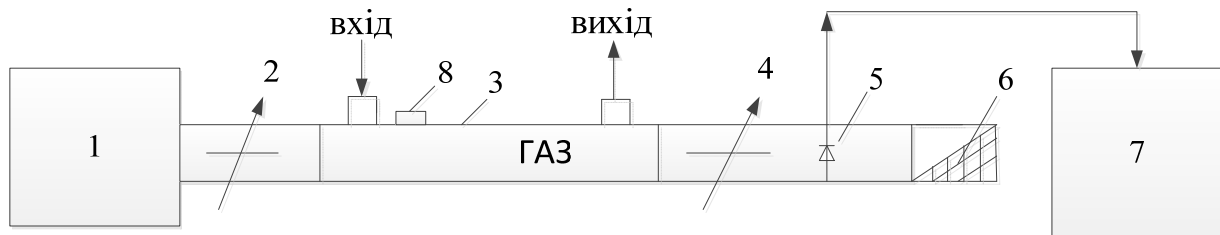


Рис. 5. Структурна схема вимірювального перетворювача вологості газу:
1 – НВЧ генератор, 2 і 4 – атенюатори, 3 – вимірювальна кювета, 5 – діодна секція, 6 – узгоджене навантаження, 7 – індикаторний пристрій, 8 – сенсори температури та тиску

Вимірювальний перетворювач містить НВЧ генератор 1, атенюатори 2 і 4, вимірювальну кювету 3, діодну секцію 5, узгоджене навантаження 6, індикатор 7 та сенсори температури та тиску 8.

НВЧ генератор 1 випромінює електромагнітну енергію з довжиною хвилі $\lambda = 3\text{ см}$. Ця електромагнітна енергія потрапляє на атенюатор 2, з якого надходить на вимірювальну кювету 3 [9]. Через вхідний штуцер (вхід) в вимірювальну кювету 3, що представляє собою стандартний 3 см хвилевід, закачується досліджуваний газ. Електромагнітна енергія проходить через шар досліджуваного газу в хвилеводі, послаблюється в залежності від кількості води, що міститься в природному газі, і надходить на атенюатор 4 [10]. З атенюатора 4 вона потрапляє на високочастотний діод 5, який перетворює електромагнітну енергію в постійний струм, що змінюється в залежності від величини діелектричної проникності досліджуваного газу в даний період часу. Проходячи діодну секцію 5, електромагнітна хвиля поглинається узгодженим навантаженням 6. Високочастотний діод 5 випрямляє високочастотний струм, що надходить на нього, величина якого фіксується індикаторним пристроєм 7. Виходячи з опису видно, що електромагнітна хвиля, що проходить вимірювальну кювету 3, має характер хвилі, що біжить. Наявність сенсорів температури та тиску 8 дозволяє врахувати відповідний тиск і температуру при вимірювальному перетворенні.

За допомогою цього пристрою можна вимірювати як ослаблення амплітуди, так і зміну фази електромагнітного сигналу, що проходить через досліджуваний газ.

Висновки. Запропоновано математичну модель НВЧ вимірювального перетворення вологості природного газу, суть якого полягає у вимірюванні потужності НВЧ сигналу біжучої хвилі на виході хвилеводу, що відповідає вологості газу шляхом використання НВЧ сигналу біжучої хвилі. Проведено дослідження залежності потужності біжучої хвилі від абсолютної вологості водяної пари при різних значеннях довжини проходження НВЧ сигналу у вологому середовищі з урахуванням температури та тиску. Встановлено, що зі зростанням абсолютної вологості водяної пари потужність випромінювання спадає за експоненціальним законом. Довжина електромагнітної хвилі, а також відстань проходження НВЧ сигналу визначає поріг чутливості вимірювального перетворення вологості. Крім цього встановлено, що значення похибки, яка

вноситься впливом температури та тиску, є незначною. Запропоновано структурну схему НВЧ вимірювального перетворювача вологості природного газу, описано принцип його роботи.

Результати досліджень дають можливість стверджувати про перспективність для практичного застосування вимірювання вологості природного газу засобів, основаних на НВЧ методі біжучої хвилі.

Література

1. Мухитдинов М. Оптические методы и устройства контроля влажности / М. Мухитдинов, Э. С. Мусаев. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 96 с.
2. Берлинер М. А. Измерения влажности / М. А. Берлинер. – М. : Энергия, 1973. – 400 с.
3. ГОСТ 5542-87 Газ горючий природный для промышленного и коммунально-бытового назначения. Технические условия. Госстандарт России (01.01.1988). М. : ИПК Издательство стандартов, 2000 ; 2004.
4. Korotcenkov G. Handbook of Humidity Measurement, Volume 1: Spectroscopic Methods of Humidity Measurement / G. Korotcenkov. – CRC Press Published March 26, (2018) Reference - 372 P.
5. Брандт А. А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах / Брандт А.А. – М. : Физматгиз, 1963. – 404 с.
6. Кричевский Е. С. Теория и практика экспрессного контроля влажности твердых и жидких материалов / Е. С. Кричевский, В. К. Бензарь, М. В. Венедиктов. – М.: Энергия, 1980. – 240 с.
7. Moisture Measurement in Natural Gas Rolf Kolass. Michell Instruments GmbH, Friedrichsdorf, Germanu, Cris Parker, Michell Instruments Ltd, Cambridge, UK., 2016. [Online]. Available: <http://www.ebookpp.com/mo/mositure-doc.html>.
8. Бакуменко О. І. Нові розробки у галузі визначення температури точки роси природного газу / О. І. Бакуменко // Трубопровідний транспорт, № 4 (94), 2015. –с. 16-26.
9. Yosyp Y. Bilinsky, Yosip R. Saldan, Kostyantyn V. Ogorodnik, Alexander A. Lazarev, Oksana S. Horodetska, Tomasz Zyska, Aisha Mussabekova, "New ultrasound approaches to measuring material parameters", Proc. SPIE 10808, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2018, 108085F (1 October 2018); doi: 10.1117/12.2501637.
10. Білінський Й.Й. Аналізатор вологості природного газу та оцінка вірогідності вимірювального контролю вологості/ Й.Й. Білінський, О.С. Городецька, В.В. Онушко // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2012. – №3. – С. 28-31.

References

1. Muhitdinov M. Opticheskie metody i ustrojstva kontrolja vlazhnosti / M. Muhitdinov, Je. S. Musaev. M. : Jenergoatomizdat, 1986. 96 s.
2. Berliner M. A. Izmerenija vlazhnosti / M. A. Berliner. M. : Jenergija, 1973. 400 s.
3. GOST 5542-87 Gaz gorjuchij prirodnyj dlja promyshlennogo i kommunal'no-bytovogo naznachenija. Tehnicheskie uslovija. Gosstandart Rossii (01.01.1988). M. : IPK Izdatel'stvo standartov, 2000 ; 2004.
4. Korotcenkov G. Handbook of Humidity Measurement, Volume 1: Spectroscopic Methods of Humidity Measurement / G. Korotcenkov. CRC Press Published March 26, (2018) Reference - 372 P.
5. Brandt A. A. Issledovanie dijelektrikov na sverhvysokih chastotah / Brandt A.A. M. : Fizmatgiz, 1963. 404 s.
6. Krichevskij E. S. Teorija i praktika jekspressnogo kontrolja vlazhnosti tverdyh i zhidkih materialov / E. S. Krichevskij, V.K. Benzar', M. V. Venediktov. M.: Jenergija, 1980. 240 s.
7. Moisture Measurement in Natural Gas Rolf Kolass. Michell Instruments GmbH, Friedrichsdorf, Germanu, Cris Parker, Michell Instruments Ltd, Cambridge, UK., 2016. [Online]. Available: <http://www.ebookpp.com/mo/mositure-doc.html>.
8. Bakumenko O. I. Novi rozrobki u galuzi viznachenija temperaturi tochki rosi prirodного gazu / O. I. Bakumenko // Truboprovodnij transport, № 4 (94), 2015. s. 16-26.
9. Yosyp Y. Bilinsky, Yosip R. Saldan, Kostyantyn V. Ogorodnik, Alexander A. Lazarev, Oksana S. Horodetska, Tomasz Zyska, Aisha Mussabekova, "New ultrasound approaches to measuring material parameters", Proc. SPIE 10808, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2018, 108085F (1 October 2018); doi: 10.1117/12.2501637.
10. Bilins'kij J.J. Analizator vologosti prirodного gazu ta ocinka virogidnosti vimirjuval'nogo kontrolju vologosti/ J.J. Bilins'kij, O.S. Gorodec'ka, V.V. Onushko // Vimirjuval'na ta obchisljuval'na tehnika v tehnologichnih procesah. – 2012. – №3. – S. 28-31.

Рецензія/Peer review : 8.4.2019 р. Надрукована/Printed : 2.6.2019 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Кичак В. М.

О ПОГРЕШНОСТИ КОРРЕЛЯЦИОННОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЙ, ИСПОЛЬЗУЮЩЕГО ПСЕВДОСЛУЧАЙНЫЕ СИГНАЛЫ

Корреляционный метод определения характеристик динамических систем является весьма важным методом анализа, который рассматривается в статье. В частности, решается задача оценки погрешностей, которые возникают при его использовании. Исследованы погрешности, обусловленные не идеальностью характеристик при идентификации случайного процесса. Решение этой задачи заключается в получении необходимых требований к генератору шума. В итоге получено количественное соотношение для каждого конкретного случая, оценивающее погрешность определения импульсной характеристики исследуемой системы.

Ключевые слова: корреляционный метод, корреляционная функция, M-последовательности, дискретизация спектра, уравнение Винера-Хопфа, свертка

ALEKSANDR ALEKSANDROVITSH VISHENSKIY

National Technical University of Ukraine "I. Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

ON THE ERROR OF THE CORRELATION METHOD OF MEASUREMENT USING A PSEUDO-RANDOM SIGNALS

Correlation method for determining the characteristics of dynamic systems is a very important method of analysis, which is considered in the article. In particular, the problem of estimating the errors that arise when using the correlation method is solved. The investigated errors due to non-ideal characteristics when identifying a random process. The solution to this problem is to obtain the necessary requirements for the noise generator. The initial premise of the stated material is an imitation of a random process using pseudo-random numerical M-sequences. The solution to this problem is to obtain the necessary requirements for the noise generator. The initial premise of the stated material is an imitation of a random process using pseudo-random numerical M-sequences. The use of these sequences causes specific errors of two types, among which there is an error due to the periodic repetition of sections in them. The second error is caused by the presence of a correlation between the elements of the sequence, i.e. it is actually due to the finite transmission bandwidth of the process. At a qualitative level, based on a priori information about the possible values of the parameters of the estimated impulse response of the system, the conditions that the test sequence of random numbers must satisfy are determined. The first such condition, which is determined, is that the period of repetition of sections of a sequence is obviously a larger integral, on which the impulse response is nonzero. The second is that the test sequence has a uniform portion of the energy spectrum, the width of which exceeds the frequency band with frequency characteristics other than zero. These conditions obtained on the basis of the physical meaning of the correlation method are approximate. As a result, a quantitative ratio, for each specific case, was obtained, evaluating the error in determining the impulse response of the system under study. Based on this assessment, it is easy to determine the required characteristics of the test sequence for practical purposes.

Keywords: correlation method, correlation function, M-sequences, spectrum discretization, Wiener-Hopf equation, convolution.

Введение

Корреляционный метод определения характеристик динамической системы является весьма эффективным. Эта особенность проявляется при идентификации физической системы путем определения ее импульсной переходной функции сигнала, который возбуждал бы систему почти также, как идеальный. В частности, при реализации корреляционного метода требуется случайный δ -коррелированный сигнал. Трудности использования физических генераторов белого шума в этом случае заставляют прибегать к применению тестовых псевдослучайных испытательных сигналов. Преимущественное распространение получили псевдослучайные последовательности максимальной длины (M -последовательности), генерируемые сдвиговыми регистрами [1]. Однако отличия их спектральных и статистических характеристик от белого шума приводят к искажениям при идентификации системы, которые необходимо оценить и уменьшить до требуемого предела путем надлежащего выбора параметров тестового сигнала. При этом имеют место два типа трудностей связанных с погрешностью периодичности последовательности (дискретизации спектра) и погрешностью отличия корреляционной функции тестового сигнала в пределах периода от идеальной δ -функции (погрешности «окраски» спектра).

Таким образом, возникает задача оценки погрешности корреляционного метода, обусловленной не идеальностью характеристик случайного процесса, используемого в практической метрологии. Решение этой задачи предлагается в настоящей работе.

1. Анализ возникающих погрешностей при использовании корреляционного метода.

Как уже отмечалось, использование корреляционного метода для определения характеристик динамической системы сопровождается двумя типами погрешностей. Известно, что этот метод основан на измерении импульсной переходной функции $h(\tau)$ с помощью подаваемого на коррелометр псевдослучайного цифрового сигнала с корреляционной функцией $R(\tau)$, имеющей период T . Как известно, взаимная корреляционная функция входного и выходного процессов связана с автокорреляционной функцией входного процесса уравнением Винера-Хопфа. Исходя из этого уравнения, оценку импульсной

переходной характеристики получаем путем приравнивания ее к взаимно-корреляционной функции, которая имеет вид

$$\tilde{h}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t - \tau)R(t)dt. \quad (1)$$

Выполняя затем с (1) преобразование Фурье на основании теоремы о свертке, находим

$$\tilde{H}(\omega) = H(\omega)\rho(\omega), \quad (2)$$

где $\tilde{H}(\omega)$ – спектр сигнала на выходе устройства; $H(\omega)$ – частотная характеристика исследуемой системы; $\rho(\omega)$ – спектр мощности тест-сигнала. Таким образом, отличие $H(\omega)$ от частотной характеристики исследуемой системы определяется отличием $\rho(\omega)$ от единичной функции. Для тестового сигнала в виде M -последовательности такие отличия определяются двумя характерными особенностями $\rho(\omega)$, которые будут рассмотрены далее.

Раскладывая функцию $R(\tau)$ в ряд Фурье и подставляя ее в выражение для $\rho(\omega)$ как Фурье-образа функции $R(\tau)$, получаем

$$\rho(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} R_n \delta(\omega - n\Omega), \quad \Omega = \frac{1}{T}.$$

Тогда, используя фильтрующее свойство δ -функции выражение (2) примет вид.

$$\tilde{H}(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} R_n H(n\Omega) \delta(\omega - n\Omega). \quad (3)$$

И поскольку

$$R_n = \frac{1}{T} \rho_T(n\Omega),$$

где $\rho_T(\omega)$ – преобразование Фурье-функции

$$\begin{aligned} R(\tau); & 0 \leq \tau \leq T; \\ R_T(\tau) = & 0; \tau > T, \end{aligned}$$

то равенство (3) будет

$$\tilde{H}(\omega) = H(\omega)\rho_T(\omega)S_{\Omega}(\omega). \quad (4)$$

В правой части этого равенства множитель $S_{\Omega}(\omega) = \Omega \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(\omega - n\Omega)$, который называется функцией идеальной дискретизацией или функцией гребенки [2], обусловлен периодичностью $R(\tau)$.

На основании теоремы о свертке с учетом коммутативности свертки из (4) получим эквивалентное равенство во временной области

$$\tilde{h}(\tau) = h(\tau) * R_T(\tau) * S_T(\tau) \quad (5)$$

Множитель $\rho_T(\omega)$, в правой части (4), определяет отличие одного импульса корреляционной функции от δ -функции и приводит к окраске спектра используемого текст-сигнала.

Таким образом, анализ погрешности корреляционного метода измерений при использовании псевдослучайных сигналов можно разделить на два этапа, учитывая, что в результирующем равенстве (4) оба этих фактора входят равноправно в виде независимых множителей.

1.1. Искажения дискретизации спектра.

Пусть $\rho_T \equiv 1$, тогда

$$\tilde{H}(\omega) = H(\omega)S_{\Omega}(\omega) \quad (6)$$

Для анализа этого вида погрешности учтем, что преобразование Фурье-функции $S_{\Omega}(\omega)$ является также функцией гребенки [2]. Тогда

$$S_T(\tau) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(\tau - nT) \quad (7)$$

Подставляя (7) в (5) с учетом (6), получим

$$\tilde{h}(\tau) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} h(\tau - nT) \quad (8)$$

Таким образом, идеальная дискретизация спектра приводит к преобразованию повторения,

зключаємося в том, що в (8) функції $h(\tau - nT)$ при різних n можуть перекриватися. Виділяючи в (8) слагаєме, описуєме неіскаженну характеристику, находим $\tilde{h}(\tau) \equiv h(\tau + nT)$. В частности, для причинных линейных систем погрешность дискретизации тест-сигнала имеет вид

$$\delta_g(\tau) = \sum_{n=1}^{\infty} h(\tau + nT) \quad (9)$$

Это соотношение в принципе позволяет оценить необходимый период M -последовательности, при котором погрешность не превышает заданного значения. Так, например, аппроксимируя «хвосты» импульсной функции с временем реакции τ_0 экспоненциальной зависимости

$$h(\tau) \approx \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_0}\right)$$

из (9) получим $\delta_d(\tau) \approx \frac{[\exp(-\frac{\tau}{\tau_0})]}{[(\frac{T}{\tau_0}) - 1]}$, $0 \leq \tau \leq T$, что обеспечивает во всей области наблюдения ошибку,

не превышающую значения $\delta_{\max} = \frac{1}{[\exp(\frac{T}{\tau_0}) - 1]}$, откуда находим необходимую оценку для периода M -

последовательности равную $T \geq \tau_0 Ln(1 + \frac{1}{\delta_{d \max}})$.

1.2. Оценка погрешности идентификации, обусловленной неравномерностью спектра.

Из соображений о качестве ясно, что искажения, обусловленные неравномерностью спектра, тем меньше чем медленнее изменяется импульсный отклик исследуемой системы, т.е. чем уже ее полоса пропускания. Понятно также, что снижению этой погрешности будет способствовать уменьшение длительности импульсов генератора M -последовательности. Задача заключается в получении количественных соотношений между рассматриваемой погрешностью и указанными выше факторами.

Для оценки погрешности в определении $\tilde{h}(\tau)$, обусловленной неравномерностью спектральной плоскости $S_T(\omega)$ M -последовательности, будем считать, что погрешности дискретизации пренебрежимо малы, так что

$$\tilde{H}(\omega) = S_T(\omega)H(\omega) \quad (10)$$

Используя явное выражение для автокорреляционной функции M -последовательности

$$1 - \frac{|\tau|}{\theta} \left(1 + \frac{1}{N}\right); |\tau| \leq \theta;$$

$$R_T(\tau) = a^2$$

$$1 - \frac{1}{N}; 0 \leq |\tau| \leq (N-1)\theta,$$

Непосредственным подсчетом получаем

$$S_T(\omega) = a^2 \left(1 + \frac{1}{N}\right) \left(\frac{2 \sin \frac{\omega\theta}{2}}{\omega\theta}\right)^2 - \frac{2 \sin \frac{\omega T}{2}}{\omega T}, \quad (11)$$

где a^2 – амплитуда корреляционной функции; θ – период повторения тактовых импульсов; $T=2^n - 1$ (n – число ячеек регистра сдвига).

Приравнявая мощность тестовой последовательности к единице

$$\left(\frac{N+1}{N} a^2 \theta = 1\right),$$

представляем равенство (10) в виде $\tilde{H}(\omega) + \delta_c(\omega)$, где $\delta_c(\omega) = H(\omega)[S_T(\omega) - 1]$ – спектральная плотность эффективных аддитивных искажений.

Используя разложение в ряд Тейлора функции

$$\frac{\sin^2 x}{x^2}$$

в (11), получаем выражение для $\delta_c(\omega)$ в виде

$$\delta_c(\omega) \equiv \delta_c^1(\omega) + \delta_c^2(\omega) \tag{12}$$

Выполняя обратное преобразование Фурье, будем иметь

$$\delta_c(\tau) = \delta_c^1(\tau) + \delta_c^2(\tau) \tag{13}$$

Оценим каждое из слагаемых, используя (12) и учитывая соотношение

$$F^{-1}[\omega^{2n} H(\omega)] = (-1)^n \frac{d^{2n}}{d\tau^{2n}} h\tau,$$

находим

$$\delta_c^1(\tau) = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n \theta^{2n}}{(2n+2)!} \frac{d^{2n} h(\tau)}{d\tau^{2n}} \tag{14}$$

Определяя норму погрешности $\delta_c^1(\tau)$ и учитывая неравенство Минковского, получаем оценку относительной погрешности

$$\frac{\|\delta_c^1(\tau)\|}{\|h(\tau)\|} \leq 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\theta^{2n}}{(2n+2)!} \frac{\|h^{(2n)}(\tau)\|}{\|h(\tau)\|} \tag{15}$$

Соотношения (14), (15) подтверждают соображения о качестве, приведенные выше.

Для оценки вклада второго слагаемого в погрешность (13) заметим, что

$$\delta_c^2(\tau) = P\left(\tau, \frac{T}{2}\right) * h(\tau),$$

где

$$1; |\tau| < \frac{T}{2};$$

$$P\left(\tau, \frac{T}{2}\right) =$$

$$0; |\tau| > \frac{T}{2}.$$

Таким образом,

$$\delta_c^{(2)}(\tau) = \frac{N}{2T(N+1)} \int_{\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} h(\tau-t) dt. \tag{16}$$

Как видно из выражения (16), по характеру искажений это слагаемое определяет почти постоянную величину (при больших T) таких, что

$$T \gg \frac{1}{\Delta\omega},$$

где $\Delta\omega$ – полоса пропускания исследуемой системы) добавку, которая может рассматриваться как систематическая погрешность для всего диапазона изменений аргумента τ . Действительно, в этом приближении и предположении о физической реализуемости системы (в частности абсолютной интегрируемости $h(\tau)$) найдем

$$|\delta_c^2(\tau)| < \frac{1}{2T} \int_{-\infty}^{\infty} |h(\tau)| dt = \frac{W}{2T}, \tag{17}$$

так что относительная погрешность

$$\frac{|\delta_c^2(\tau)|}{\|h(\tau)\|} < \frac{1}{2T} \frac{W}{\|h(\tau)\|}. \tag{18}$$

Таким образом, выражения (17), (18) устанавливают количественные соотношения между вторым слагаемым погрешности окраски спектра и периодом M -последовательности. Кроме того, по своему

характеру это слагаемое, как уже отмечалось, близко к систематической постоянной погрешности и не играет большой роли в задачах идентификации характеристик линейных систем.

Выводы

Подытоживая изложенное в настоящей работе, отметим, что поставленная задача получения количественных соотношений, позволяющих в каждом конкретном случае оценить погрешности определения импульсной характеристики исследуемой системы, и, исходя из этих значений, определить требуемые характеристики тестовой последовательности, решена. Получены выражения, связывающие значения погрешности с параметрами системы.

Литература

1. Грановский В.А. Динамические измерения. Основы метрологического обеспечения / В.А. Грановский. – Л. : Энергоатомиздат, 1984. – 224 с.
2. Сороко Л.М. Основы голографии и когерентной оптики / Л.М. Сороко. – М. : «Наука» Главная редакция физико-математической литературы, 1971. – 616 с.

References

1. Granovskij V.A. Dinamicheskie izmereniya. Osnovy metrologicheskogo obespecheniya / V.A. Granovskij. – L. : Energoatomizdat, 1984. – 224 s.
2. Soroko L.M. Osnovy golografii i kogerentnoj optiki / L.M. Soroko. – M. : «Nauka» Glavnaya redakciya fiziko-matematicheskoy literatury, 1971. – 616 s.

Рецензія/Peer review : 2.5.2019 р. Надрукована/Printed : 2.6.2019 р.

Рецензент: д.т.н. Вышинский В.А.

В.Д. КОСЕНКОВ

Хмельницький національний університет

Д.А. ІВЛЄВ

Одеський національний політехнічний університет

АНАЛІЗ ШЛЯХІВ ПОСЛАБЛЕННЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ПОПЕРЕЧНОЇ РЕАКЦІЇ ЯКОРЯ В МАШИНАХ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

В статті зібрані та проаналізовані засоби боротьби з поперечною реакцією якоря в машинах постійного струму лінійного та обертового типів, які не розглядаються в класичній теорії електричних машин. З класичної теорії електричних машин постійного струму відомо, що основними конструктивними засобами зменшення впливу поперечної реакції якоря на основне магнітне поле є збільшення повітряного проміжку під краями полюсних наконечників та розміщення в пазах полюсів компенсаційної обмотки. В даній роботі проаналізовані методи, які дозволяють послабити поперечну реакцію якоря без недоліків, що обговорені вище, та які з'явилися останнім часом при розробці конструкцій електричних машин лінійного та обертового типів. Сутність цих методів полягає у виконанні, в межах кожного полюсного ділення, магнітопроводу з окремих частин, розділених немагнітним зазором, що збільшує опір магнітному потоку поперечної реакції якоря. Більший ефект для магнітних та обертових машин дає виконання магнітопроводу індуктора з окремих П-подібних частин, де у зв'язку з суттєвим послабленням поперечної реакції якоря робочий повітряний проміжок можна звести до технологічного.

Ключові слова: магнітне поле, поперечна реакція, якор, електричні машини, постійний струм, магнітний потік, електричний двигун.

V.D. KOSENKOV

Khmelnitskyi National University

D.A. IVLIEV

Odessa National Polytechnic University

ANALYSIS OF WAYS OF DIMINISHING OF THE MAGNETIC FIELD OF TRANSVERSAL REACTION OF ANCHOR IN MACHINES OF DIRECT CURRENT

The article gives an overview and analysis of the latest developments devoted to ways of weakening the magnetic fluxes of the transverse anchor reaction in electric direct current machines, both linear and rotary types. Designs use constructive tools that are not considered in the classical theory of electric machines. The essence of the means is reduced to the implementation of the pole system from individual parts, which are separated by non-magnetic gaps in the flow of transverse anchor reaction. Methods which allow to weaken the transverse anchor reaction without the disadvantages and which appeared recently after the design of electric and linear machines and rotary type machines have been analysed in this paper. The essence of these methods is the execution, within each pole division, of a magnetic core of separate parts separated by a non-magnetic gap, which increases the resistance to the magnetic flux of the transverse anchor reaction. The greater effect for magnetic and rotary machines gives the magnetic rod of the inductor on individual P-shaped parts, where, in connection with the substantial weakening of the transverse anchor reaction, the working air gap can be reduced to a technological one. For a rotating electric motor of direct current there is effective construction, where a winding is placed in the stator slots, which serves as an anchor winding and excitation winding, and rotor without a winding is executed in an axial direction from separate ferromagnetic parts.

Keywords: magnetic field, transverse reaction, anchor, electric machines, direct current, magnetic flux, electric motor.

Постановка задачі. З класичної теорії електричних машин постійного струму [1, 2] відомо, що основними конструктивними засобами зменшення впливу поперечної реакції якоря на основне магнітне поле є збільшення повітряного проміжку під краями полюсних наконечників та розміщення в пазах полюсів компенсаційної обмотки. Між тим, перший спосіб зменшує і основний магнітний потік полюса, а другий спосіб ускладнює конструкцію електричної машини, збільшує витрати міді і застосовується в машинах великої потужності (>80...100 кВт на полюс [1]).

Тому є доцільним розглянути і проаналізувати методи, які дозволяють послабити поперечну реакцію якоря без недоліків, що обговорені вище, та з'явилися останнім часом при розробці конструкцій електричних машин лінійного та обертового типів.

Огляд і аналіз новітніх розробок. Слід відмітити, що спочатку конструктивні засоби боротьби з поперечною реакцією якоря з'явилися для лінійних машин постійного струму. На рис. 1 наведено конструкцію лінійного двигуна постійного струму, у якого на рухомому елементі 1 розміщені обмотка збудження 2 та обмотка якоря 3, а нерухомий елемент виконаний з окремих феромагнітних брусків 4, встановлених на міжполюсній відстані один від одного.

В роботі [3] запропоновано розділяти феромагнітні бруски (полюси) 4 в напрямку, поперечному руху, немагнітним зазором по осі симетрії (немагнітною вставкою) 5. Доведено, що при 2–4-кратному немагнітному зазорі в брусках порівняно з робочим зазором максимальне значення індукції поля поперечної реакції якоря зменшується на 20–25%. Подальше збільшення зазору між половинками бруска неефективно, тому що при припущенні, що магнітна провідність між половинками бруска дорівнює нулю, поле реакції якоря буде послаблено тільки вдвічі. Але це потребує великої величини зазору, а, значить, і обумовить зменшення основного магнітного потоку.

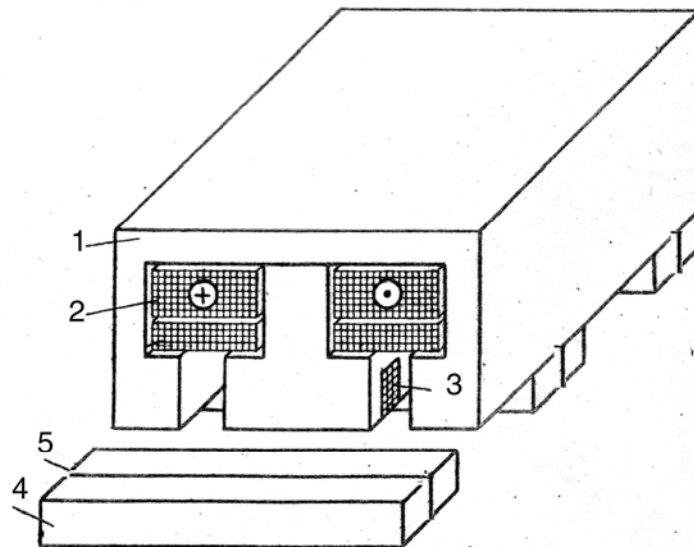


Рис. 1. Лінійний електричний двигун постійного струму з розміщенням обмотки якоря та обмотки збудження на рухомому елементі

Ефект послаблення поля попередньої реакції якоря може бути досягнутий також шихтовкою брусків, але технологія їх кріплення погіршується.

Відмітимо, що у класичних машин постійного струму обертового типу розділення полюсів навпіл по осі машини практично не зменшить поле поперечної реакції якоря, тому що ярмо індуктору шунтує немагнітний зазор.

Також для лінійної машини постійного струму розроблений магнітопровід індуктора [4], який дозволяє звести робочий зазор машини майже до технологічного (рис. 2)

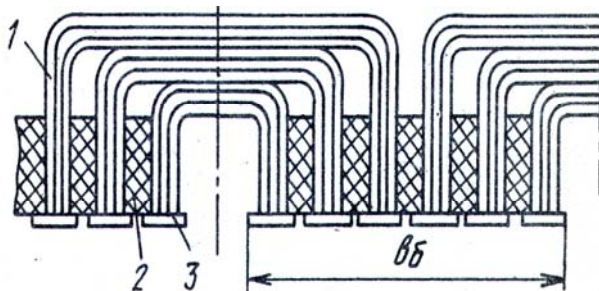


Рис. 2. Конструкція магнітопроводу індуктора лінійної машини

Бачимо, що тут на шляху замикання поля поперечної реакції якоря велика кількість немагнітних зазорів.

Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.
Рис. 4. Конструктивна схема індуктора циліндричного лінійного двигуна

На рис. 2 показано: 1 – шихтуючі пластини індуктора; 2 – немагнітні прокладки; 3 – суцільна феромагнітна накладка полюса (рис. 3).

Магнітопровід виготовлюється за технологією виготовлення витих магнітопроводів з тією різницею, що через деяку кількість витків сталі встановлюється немагнітні вставки 2. Потім магнітопровід розрізається на дві частини.

Ідея конструкції магнітопроводу роботи [4] реалізована в індукторі циліндричного лінійного двигуна постійного струму [5], конструктивна схема якого показана на рис. 4.

Тут індуктор виконується у вигляді ряду феромагнітних циліндрів різного діаметру 1, коаксіально розташованих один в одному, причому довжина циліндра зростає зі зростанням його діаметру. В кожен циліндр з обох сторін вставлені феромагнітні кільця 2, а кільцева обмотка збудження 3 розміщена всередині найменшого циліндру. Центрування циліндрів 1 та проміжок між феромагнітними кільцями 2 забезпечується неферомагнітними вставками 4 та 5 відповідно. Товщину пластини 5 слід обирати не більше ширини відкритих пазів якоря. З рис. 4 бачимо, що на шляху потоку поперечної реакції якоря $\Phi_{ад}$ є великі немагнітні зазори, що дозволяє звести робочий зазор машини до технологічного і зменшити магніторушійну силу (МРС) обмотки збудження.

Відома також конструкція лінійного електричного двигуна постійного струму [6], у якого нерухома частина містить три якоря зі спільною обмоткою та дві обмотки збудження, а нерухомі бруски виконані зі зміщенням на полюсну поділку під крайніми якорями та розділені навпіл у напрямку, перпендикулярному руху.

В Одеському національному політехнічному університеті розроблений ряд конструкцій обертових електричних машин бііндукторного типу, у яких нерухомий магнітопровід з обмотками якоря та збудження виконаний у вигляді П-подібних частин [7] або Ш-подібних частин [8], не пов'язаних одна з одною феромагнітними елементами. Мета тут єдина – ослаблення поля поперечної реакції якоря. На рис. 5 наведено конструктивну схему торцевої машини бііндукторного типу П-подібними магнітопроводами індуктора.

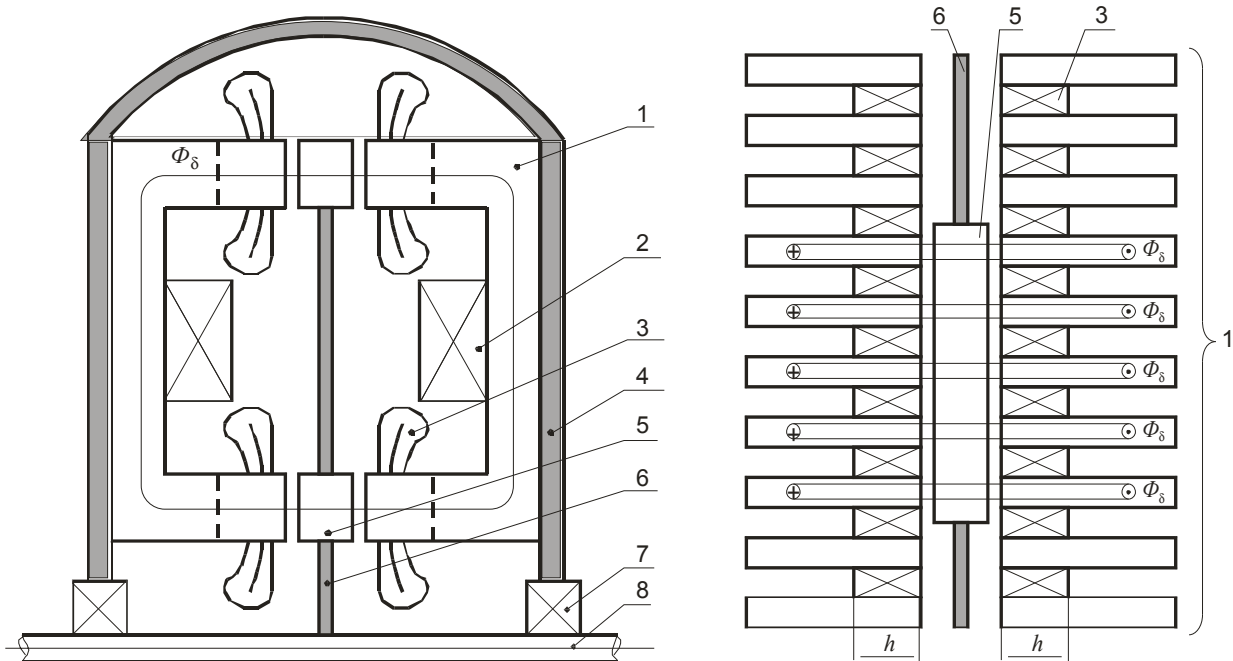


Рис. 5. Конструктивна схема бііндукторного двигуна (рис. 5а) та розгортка двигуна (рис. 5б)

Конструкція включає П-подібні магнітопроводи 1, що кріпляться до неферомагнітного корпусу 4, кільцеву обмотку 2 та обмотку якоря 3. Рухома частина представляє феромагнітні полюси 5, що закріплені на неферомагнітному диску 6, який закріплений на валу 8. Вал обертається в підшипниках 7 (рис. 5,а).

На рис. 5,б показано шляхи замикання магнітного потоку збудження $\Phi_{зб}$, якщо дивитись на розгортку активної зони машини в межах двополюсних ділень.

В дослідженні [9] наведені особливості визначення реактивної ЕРС такої машини і отримано вираз для повної питомої пазової провідності λ_{Π} .

У винаході [10] також реалізується ідея виготовлення магнітопровода індуктора з непов'язаних одна з одною окремих феромагнітних пластин (зубців), а на роторі використовуються Г-подібні зубці.

Поперечна реакція якоря в таких конструкціях послаблюється, але технологія виготовлення значно ускладнюється.

Під час аналізу поля реакції якоря в машинах, де лобові частини якорної обмотки охоплені магнітопроводом для замикання основного магнітного потоку, слід враховувати схему укладки якорної обмотки. Тут доцільно надавати перевагу звичайній двослойній обмотці машини постійного струму [1, 2], а обмотки [11, 12], де секції укладаються групами не рекомендуються для використання у зв'язку з наявністю пульсацій поздовжнього магнітного поля лобових частин обмотки якоря [9]. Ці обмотки були розроблені для лінійних машин постійного струму, у яких лобові частини обмотки не охоплені магнітопроводом. На рис. 6 показаний фрагмент одношарової обмотки для одного положення полюса (рис. 6 а), а на рис. 6 б – розподіл МРС її лобових частин.

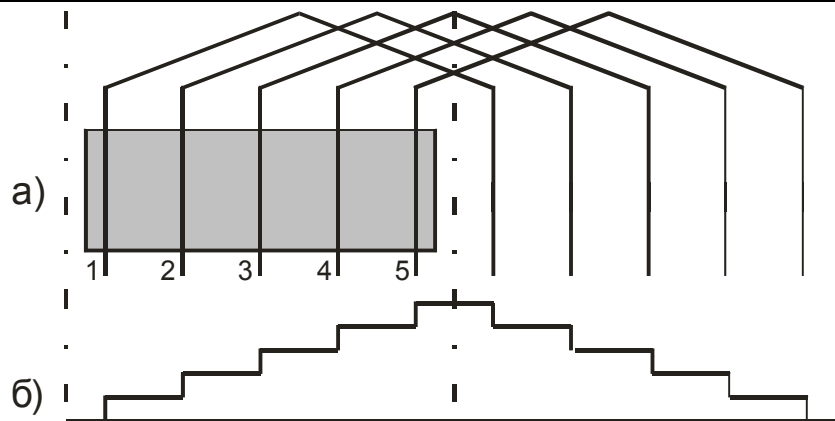


Рис. 6. Групова укладка одношарової обмотки якоря лінійного двигуна

Для лінійного двигуна такі обмотки забезпечують повне заповнення пазів якоря. Рекомендації для обертових машин постійного струму. У зв'язку з тим, що ідея розділення полюса на частини, в напрямку, перпендикулярному руху, для класичної машини не призводить до послаблення поля поперечної реакції якоря з-за суцільного ярма індуктора, можна запропонувати конструкцію виготовлення обертової частини в машині оберненого типу (рис. 7).

Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.

Рис. 7. Конструкція ротора машини оберненого типу

Тут ротор виконаний з трьох феромагнітних частин, середня частина якого насаджена на вал, а крайні – прикріплені до середньої через немагнітні прокладки.

Якірна обмотка розміщена на статорі і може одночасно виконувати і функцію обмотки збудження тією її частиною, що розміщена в будь-якій момент часу навпроти між полюсного проміжку, або на роторі може бути власна обмотка збудження.

Така конструкція також суттєво послаблює поле поперечної реакції якоря і рекомендується для двополусної машини. Наведена конструкція машини значно технологічніше ніж конструкції [7, 8, 10]. Принципово можна виконати ротор з окремих частин на кожному полюсі і для більшої кількості полюсів, але технологія виготовлення ротора ускладнюється.

Висновки. У роботі наведені конструктивні засоби боротьби з поперечною реакцією якоря, які практично не збільшують магнітний опір на шляху основного магнітного потоку. Сутність цих засобів полягає у виконанні, в межах кожного полюсного ділення, магнітопроводу з окремих частин, розділених немагнітним зазором, що збільшує опір магнітному потоку реакції якоря.

Література

1. Вольдек А.И. Электрические машины : учебник для студ. высш. техн. учебн. заведений / Вольдек А.И. – Изд. 2-е, пераб. и доп. – Л. : Энергия, 1974. – 840 с., ил.
2. Костенко М.П. Электрические машины : в 2-х ч. Ч. 1. Машины постоянного тока. Трансформаторы : Учебник для студ. высш. техн. учебн. заведений / М.П. Костенко, Л.М. Пиотровский. – [3-е изд. переаб.]. – Л. : Энергия, 1972. – 344 с., ил.
3. Косенков В.Д. Особенности вторичного элемента линейной машины с поперечным потоком в ярме индуктора / Косенков В.Д., Скубий Л.В., Беликов В.Т. – Одесса, 1979. – 11 с. – (Рук. представлена Одесским политехническим институтом. Деп. в УкрНИИТИ 26.11.1979, № 1799).
4. А.с. 1578791 СССР, МКИ H02K 1/14. Магнітопровод індуктора машини постійного струму / В.Д. Косенков, Л.В. Скубий. – Опубл. 15.07.1990, Бюл. № 26.
5. Патент UA 35916 МПК H02K 41/02. Індуктор лінійного двигуна постійного струму / В.Д. Косенков, Л.В. Скубий. – Опубл. 10.10.2008, Бюл. № 19.
6. Патент UA 126555 МПК H02K 41/02. Лінійний електричний двигун постійного струму / В.Д. Косенков. – Опубл. 25.06.2018, Бюл. № 12.
7. Булгар В.В. Применение двигателей постоянного тока в низкоскоростных безредукторных электроприводах / В.В. Булгар, Д.А. Івлев / Труды ОНПУ : научный и производственно-практический сборник. – Одесса, 2010. – Вып. 1 (33) – 2 (34). – С. 99–104.
8. Патент UA 95429 МПК H02K 19/06. Торцева електрична машина бііндукторного типу / В.В. Булгар, А.Д. Івлев, Д.А. Івлев, О.В. Яковлев, В.Д. Косенков. – Опубл. 25.07.2011, Бюл. № 14.
9. Косенков В.Д. Особливості визначення реактивної ЕРС машин постійного струму з розділними П-подібними магнітопроводами індуктора / В.Д. Косенков, Л.В. Скубий // Вимірювальна та обчислювальна техніка технологічних процесів. – 2013. – № 1. – С. 114–117.
10. Патент UA 116924 МПК H02K 29/00. Електрична машина бііндукторного типу / В.В. Булгар,

А.Д. Івлев, Д.А. Івлев, О.В. Яковлев, В.Д. Косенков. – Оpubл. 25.05.2018, Бюл. № 10.

11. А.с. 448541 СССР, МКИ Н 02 К 3/18. Однослойная петлевая обмотка якоря линейного электродвигателя постоянного тока / В.И. Артеменко, В.Т. Беликов, В.Д. Косенков. – Оpubл. 30.10.1974, Бюл. № 40.

12. А.с. 480155 СССР, МКИ Н02К 23/30. Двухослойная петлевая обмотка / В.И. Артеменко, В.Т. Беликов, В.Д. Косенков. – Оpubл. 05.08.75, Бюл. № 29.

References

1. Voldek A.I. Elektricheskie mashiny : uchebnik dlya stud. vyssh. tehn. uchebn. zavedenij / Voldek A.I. – Izd. 2-e, perab. i dop. – L. : Energiya, 1974. – 840 s., il.
2. Kostenko M.P. Elektricheskie mashiny : v 2-h ch. Ch. 1. Mashiny postoyannogo toka. Transformatory : Uchebnik dlya stud. vyssh. tehn. uchebn. zavedenij / M.P. Kostenko, L.M. Piotrovskij. – [3-e izd. pereab.]. – L. : Energiya, 1972. – 344 s., il.
3. Kosenkov V.D. Osobennosti vtorichnogo elementa linejnoy mashiny s poperechnym potokom v yarme induktora / Kosenkov V.D., Skubij L.V., Belikov V.T. – Odessa, 1979. – 11 s. – (Ruk. predstavlena Odesskim politehnicheskim intstitutom. Dep. v UkrNIINTI 26.11.1979, № 1799).
4. А.с. 1578791 SSSR, МКИ N02K 1/14. Magnitoprovod induktora mashiny postoyannogo toka / V.D. Kosenkov, L.V. Skubij. – Opubl. 15.07.1990, Byul. № 26.
5. Patent UA 35916 MPK N02K 41/02. Induktor liniinoho dvyhuna postiinoho strumu / V.D. Kosenkov, L.V. Skubii. – Opubl. 10.10.2008, Biul. № 19.
6. Patent UA 126555 MPK N02K 41/02. Liniinyi elektrychnyi dvyhun postiinoho strumu / V.D. Kosenkov. – Opubl. 25.06.2018, Biul. № 12.
7. Bulgar V.V. Primenenie dvigatelej postoyannogo toka v nizkoskorostnyh bezreduktornyh elektroprivodah / V.V. Bulgar, D.A. Ivlev / Trudy ONPU : nauchnyj i proizvodstvenno-prakticheskij sbornik. – Odessa, 2010. – Vyp. 1 (33) – 2 (34). – S. 99–104.
8. Patent UA 95429 MPK N02K 19/06. Tortseva elektrychna mashyna biinduktornoho typu / V.V. Bulhar, A.D. Ivlev, D.A. Ivlev, O.V. Yakovlev, V.D. Kosenkov. – Opubl. 25.07.2011, Biul. № 14.
9. Kosenkov V.D. Osoblyvosti vyznachennia reaktivnoi ERS mashyn postiinoho strumu z rozdilnymi P-podibnymi mahnitoprovodamy induktora / V.D. Kosenkov, L.V. Skubii // Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika tekhnolohichnykh protsesiv. – 2013. – № 1. – S. 114–117.
10. Patent UA 116924 MPK N02K 29/00. Elektrichna mashina biinduktornoho tipu / V.V. Bulgar, A.D. Ivlev, D.A. Ivlev, O.V. Yakovlev, V.D. Kosenkov. – Opubl. 25.05.2018, Byul. № 10.
11. А.с. 448541 SSSR, МКИ N 02 К 3/18. Odnoslojnaya petlevaya obmotka yakorya linejnogo elektrodvigatelya postoyannogo toka / V.I. Artemenko, V.T. Belikov, V.D. Kosenkov. – Opubl. 30.10.1974, Byul. № 40.
12. А.с. 480155 SSSR, МКИ N02K 23/30. Dvuhoslojnaya petlevaya obmotka / V.I. Artemenko, V.T. Belikov, V.D. Kosenkov. – Opubl. 05.08.75, Byul. № 29.

Рецензія/Peer review : 23.5.2019 р.

Надрукована/Printed : 2.6.2019 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Горошко А.В.

О.В. БОРОВИК

Національна академія Державної прикордонної служби України імені Богдана Хмельницького

І.О. САПОЖНИК

Хмельницький національний університет

Д.О. ЛЕВЧУНЕЦЬ

ТОВ «Радіонікс-МЛТ»

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВИБОРУ МІКРОКОНТРОЛЕРА ЗА КРИТЕРІЄМ МАКСИМІЗАЦІЇ ШВИДКОДІЇ

У даній статті розв'язано задачу вибору мікроконтролера за критерієм максимізації швидкодії. В основі розв'язання задачі знаходиться експериментальна оцінка часу готовності мікроконтролера до роботи, максимальної частоти зміни стану портів вводу/виводу, швидкості реагування цифрових портів у режимі реального часу. На основі використання запропонованого алгоритму оцінки швидкодії мікроконтролера було отримано осцилограми з частотою дискретизації 16 МГц, які дозволили сформувати статистичні масиви для прийняття рішень щодо вибору мікроконтролера. За результатами проведеного дослідження встановлено, що платформа Arduino UNO з досліджуваних найбільш поширених мікроконтролерів має найменшу швидкодію, а STM32F407VG із використанням середовища розробки Keil μ Vision v. 5.25.2.0 – найбільшу.

Ключові слова: мікроконтролер, швидкодія, критерій, arduino, експериментальне дослідження.

O.V. BOROVYK

National Academy of the State Border Guard Service of Ukraine named after Bogdan Khmelnytsky

I.O. SAPOZHNIK

Khmelnytskyi National University

D.O. LEVCHUNETS

«Radioniks-MLT» LLC

EXPERIMENTAL RESEARCH OF MCU SELECTION UNDER THE MAXIMIZATION PERFORMANCE CRITERIA

According to the latest researches, microcontrollers remain at the epicentre of tremendous growth in the Internet of Things, automotive, robotics, embedded applications and other emerging systems. Major Microcontroller suppliers have been improving their portfolios to address many of these key markets. Part of that improvement process has included merging and acquiring competitors in order to gain a quick foothold into these developing markets hereby, performance based solution of microcontroller selection task is given in the article. At the heart of the solution lays following constituents: the readiness time, input (I / O) ports change of state maximum frequency and digital port real time response speed. Based on the proposed algorithm for microcontroller performance evaluating, oscillograms with a sampling frequency of 16 MHz were obtained. They allowed to form the statistical arrays for decision making regarding to the microcontroller selection task. According to the results of the research, the Arduino UNO platform has the worst performance among selected MCUs. At the same time, STM32F407VG using Keil μ Vision v. 5.25.2.0. development environment showed the best timing results.

Keywords: microcontroller, performance, criterion, Arduino, experimental research.

Вступ

Під час проектування цифрових систем одним з найбільш актуальних завдань є завдання вибору елементної бази системи, загалом, і мікроконтролера (МК), зокрема. Складність останнього обумовлюється наявністю значної кількості МК на ринку елементної бази цифрових систем.

Питання розробки МК не втрачає своєї актуальності впродовж останніх десятиліть. Так, наприклад, офіційний проєкт Acorn RISC Machine (ARM) був розпочатий в 1983 році. І вже в 2007 році близько 98 % з більш ніж мільярдів мобільних телефонів, які продавались щорічно, були обладнані хоча б одним процесором ARM. Станом на 2009 рік на процесори ARM припадало до 90 % всіх вбудованих 32-розрядних процесорів [1]. На сьогодні ринок МК та напівпровідникових елементів здебільшого представлений такими компаніями як: Intel, NXP, Microchip, ST. Зокрема, спостерігається висока динаміка розвитку компанії Microchip, що пов'язано з купівлею нею компанії Atmel у квітні 2016 року [2].

Кожен з МК має унікальний набір команд, унікальну архітектуру, регістри та інші характеристики. В зв'язку з відмінністю наборів команд програми, що написані для одного МК, не будуть працювати на інших МК.

Діапазон застосування МК на даний час достатньо широкий, вимоги до них досить різноманітні. Кожен з них відрізняється потужністю, універсальністю, швидкістю і структурними особливостями. Зважаючи на це, вибір мікроконтролера постає серйозним завданням в ході розробки проєкту. При цьому необхідним є врахування і оцінка великої кількості параметрів та факторів, основними з яких є наступні [3–6]:

- архітектура МК (ARM/AVR/PIC та інші...);
- розрядність МК (8, 16, 24, 32, 64 біти);
- периферія МК (наявність достатньої кількості інтерфейсів вводу-виводу, АЦП та ЦАП, компараторів і таймерів);
- наявність портів (UART, SPI, USB, PWM, I2C);

- підтримка відлагоджувальних інтерфейсів (ISP, JTAG, UART, ARM SWD);
- максимальна робоча частота МК;
- розмір ОЗУ та ПЗУ в МК;
- тип корпусу (DIP, QFP, LCC, PGA, LGA, BGA);
- мінімальне та максимальне енергоспоживання МК;
- доступні мови програмування для мікроконтролерів різних типів;
- наявність літератури та технічних описів у вільному доступі;
- підтримка розробником МК (наявність відлагоджувальних програм, прикладів застосування зі схемами і вихідними текстами програм, повідомлень про помилки);
- вартість і доступність у достатньому об'ємі.

Оцінку різноманітності МК можна здійснити, наприклад, з табл. 1.

У табл. 1 наведені найбільш популярні рішення на ринку МК.

Таблиця 1

Найбільш поширені МК на ринку елементної бази

Характеристики	Atmega328	STM32F407	ESP8266	PIC32MX270
Тип процесора	AVR	ARM	Xtensa	PIC32
Розрядність	8 bit	32 bit	32 bit	32 bit
ППЗУ	32 kB	64 kB	448 kB	256 kB
ОЗУ	2 kB	20 kB	520 kB	64 kB
Частота	20 MHz	72 MHz	80 MHz	50 MHz
К-сть I/O виводів	23	37	12	19
Напруга	1.8-5.5 V	2.0-3.6	2.2-3.6	2.3-3.6
Ціна	~70 грн	~165 грн	~95 грн	~200 грн

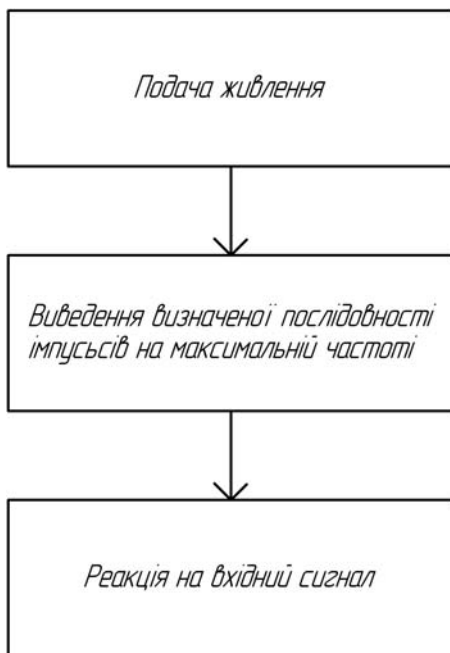


Рис. 1. Алгоритм визначення швидкодії МК

Зважаючи на різноманіття наведених параметрів і факторів, перед фахівцями постає задача вибору МК для кожного конкретного проекту.

Експериментальна частина

При виборі МК за одним параметром труднощів не виникає. Однак, якщо вибір передбачає врахування кількох, то задача ускладнюється і потребує окремого дослідження.

Важливою характеристикою МК є швидкодія. На швидкодію МК впливають такі з вище зазначених факторів та характеристик: тактова частота, розрядність, оптимізація програмного коду, апаратна або програмна реалізація необхідних для проекту модулів МК(UART, АЦП/ЦАП...).

Разом з тим, у кожному проекті слід приймати до уваги наступні базові показники швидкодії:

- час готовності до роботи;
- максимальна частота зміни стану портів вводу (вводу/виводу);
- швидкість реагування цифрових портів у режимі реального часу.

Зважаючи на комплексну природу показників швидкодії, доцільним є їх емпіричне вимірювання. Для цього пропонується використати уніфікований алгоритм роботи, зображений на рис. 1.

Наведений алгоритм враховує базові показники швидкодії. Змінюючи стани виводів МК, можна з заданою точністю відслідкувати час виконання програми. Зокрема,

перевірка максимальної частоти зміни стану портів вводу, що впливає на можливість програмної підтримки високошвидкісних протоколів передачі даних, реалізується передачею послідовності імпульсів.

Для перевірки швидкодії було обрано наступні МК (робочі середовища):

1. Atmega328P - PU (Arduino v.1.8.8.);
2. Atmega328P - PU (Atmel Studio v.7.0);
3. STM32F407VG (Keil µVision v. 5.25.2.0);
4. ESP8266 (Arduino v.1.8.8.).

Вимірювання показників швидкодії обраних МК за вказаним алгоритмом проводилось з використанням логічного аналізатора LOGIC-24M-8CH-USB та програмного забезпечення Saleae Logic 1.2.18.

Використовуючи алгоритм, наведений на рис. 1, було отримано осцилограму з частотою дискретизації 16 MHz та загальною тривалістю 5 секунд. Остання зображена на рис. 2.

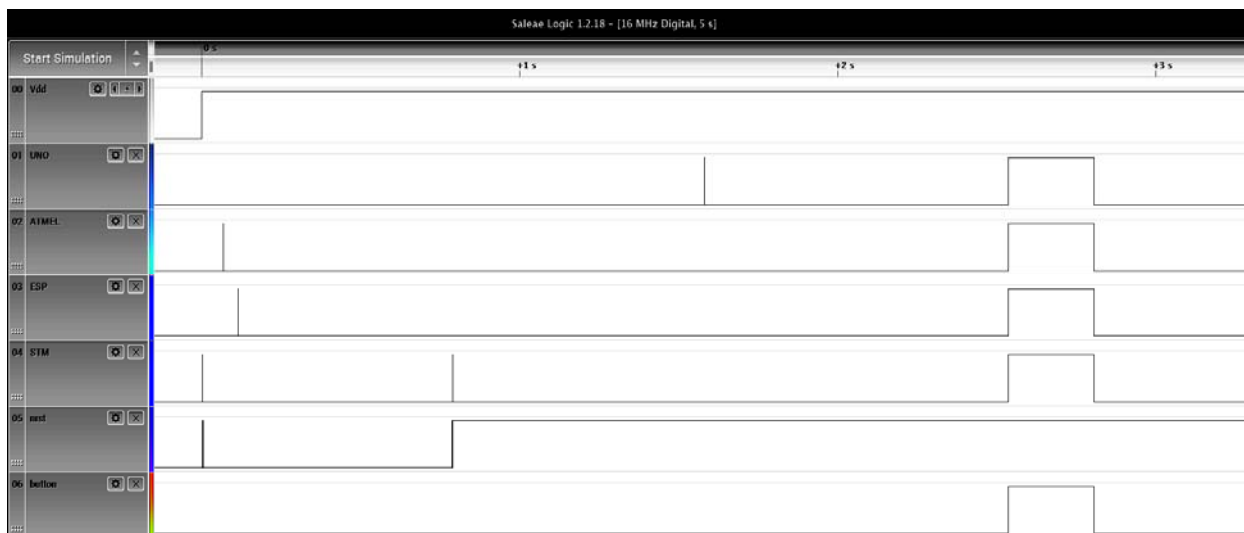


Рис. 2. Осцилограма алгоритму визначення швидкодії для обраних МК

Виведення послідовності імпульсів на максимальній частоті зображено на рис. 3. Кількість імпульсів дорівнює 64. Як видно з рисунку, тривалість імпульсу та паузи значно відрізняється для кожного з МК.

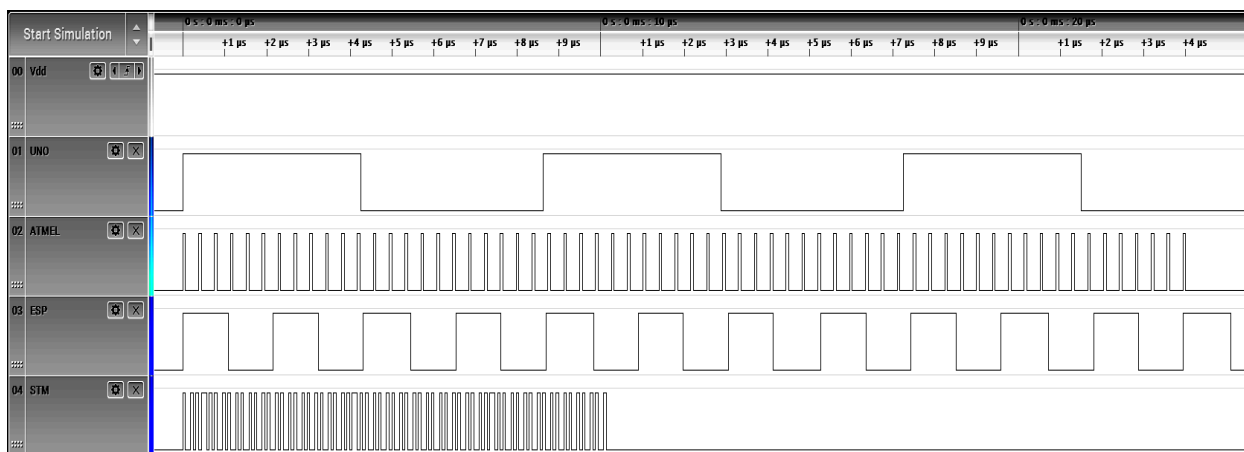


Рис. 3. Осцилограма роботи обраних МК у режимі виведення послідовності з 64-х імпульсів на максимальній частоті

Наведені осцилограми свідчать про різний час запуску МК. Зокрема, для початку виконання основного коду платформа Arduino Uno витратила найбільше часу. В свою чергу, наявність двох послідовностей імпульсів обумовлюється роботою програматора ST-Link V2, що є частиною відлагоджувальної плати STM32F407VG-Discovery. Тому доцільним є визначення часу запуску даного МК у момент встановлення виводу NRST у високий стан, а не подачею живлення, як у інших МК. Більш детальна інформація щодо цього питання наведена у табл. 2.

Як впливає з наведеного статистичного масиву, платформа Arduino UNO з МК Atmega328P - PU має найгіршу швидкодію з обраних для аналізу МК. Зокрема, час готовності до роботи на декілька порядків більший ніж у представлених альтернатив. Це обумовлено високим рівнем абстракції середовища розробки Arduino. Так, уніфікація бібліотек звернення до портів вводу/виводу даного середовища, Bootloader (UART, натомість SPI), кросплатформність створюють надлишковість логічних операцій та негативно впливають на швидкодію.

Використання Atmel Studio, альтернативи фреймворку Arduino, для контролера Atmega328P – PU дозволило досягнути значно кращих показників швидкодії. Незважаючи на відносно низьку тактову частоту даного МК, отримані результати є співрозмірними з іншими представленими рішеннями.

Повертаючись до кросплатформності фреймворку Arduino, для програмування МК ESP8266 було використано скетч, аналогічний до Atmega328P – PU. Зміни полягали в призначенні інших портів вводу/виводу. Отримані результати підтверджують факт зменшення швидкодії МК при використанні даного фреймворку.

Представник компанії STMicroelectronics показав найкращі результати за обраним алгоритмом оцінки швидкодії. Про це свідчать як отримані осцилограми, так і чисельні дані, що наведені в табл. 2.

Чисельне порівняння швидкодії обраних МК

Платформа / Метод перевірки	Atmega328P - PU (Arduino v.1.8.8.)	Atmega328P - PU (Atmel Studio v.7.0)	ESP8266 (Arduino v.1.8.8.)	STM32F407VG (Keil μ Vision v. 5.25.2.0)
Час готовності до роботи, ms	1580	68.89	114.81	0.95
Час передачі послідовності імпульсів, ms	0.557	0.0237	0.138	0.01
Тривалість одного періоду, μ s	8.65	0.375	2.125	0.16
Тривалість імпульсу, μ s	4.25	0.062	1.063	0.062
Тривалість паузи, μ s	4.375	0.3125	1.063	0.105
Реакція на високий вхідний рівень, μ s	7.37	0.38	5	0.19
Реакція на низький вхідний рівень, μ s	7.9	0.312	4.5	0.312

Висновки

За результатами проведеного дослідження швидкодії мікроконтролерів встановлено, що за критерієм максимізації швидкодії є МК STM32F407VG із використанням середовища розробки Keil μ Vision v. 5.25.2.0. Разом із тим, питання вибору мікроконтролерів є більш широким і має передбачати урахування економічної складової, швидкості розробки та інтегрованості у цільовий проект. Так, платформа Arduino має найбільшу кількість бібліотек і широку підтримку розробником, що разом із ціною політикою робить її вигідним варіантом для дрібних проектів. З позиції вибору додаткового функціоналу мікроконтролер ESP8266 характеризується наявністю інтегрованого Wi-Fi модуля. Великі та довготривалі проекти зазвичай будуються з використанням більш розвиненої архітектури. Вбудоване в STM32F407VG ядро Cortex-M4 є представником ARM процесорів, що дозволяє забезпечувати виконання широкого спектру задач.

Література

1. ACORN RISC MACHINE (ARM) FAMILY DATA MANUAL/VLSI TECHNOLOGY, INC. – 1990. – 110 с.
2. Top Microcontroller Supplier Ranking 2015-2016 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://hardwarebee.com/top-microcontroller-supplier-ranking-2015-2016/>
3. Arduino Uno rev3 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://store.arduino.cc/arduino-uno-rev3>.
4. STM32F407VG – High-performance foundation line, ARM Cortex-M4 core with DSP and FPU, 1 Mbyte Flash, 168 MHz CPU, ART Accelerator, Ethernet, FSMC [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://www.st.com/content/st_com/en/products/microcontrollers-microprocessors/stm32-32-bit-arm-cortex-mcus/stm32-high-performance-mcus/stm32f4-series/stm32f407-417/stm32f407vg.html.
5. ESP8266EX Datasheet/Esspressif Systems. – 2018. – 24 с.
6. ATmega48A/PA/88A/PA/168A/PA/328/P [DATASHEET] /Atmel Corporation. – 2015. – 49 с.

References

1. ACORN RISC MACHINE (ARM) FAMILY DATA MANUAL/VLSI TECHNOLOGY, INC. – 1990. – 110 s.
2. Top Microcontroller Supplier Ranking 2015-2016 [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : <http://hardwarebee.com/top-microcontroller-supplier-ranking-2015-2016/>
3. Arduino Uno rev3 [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : <https://store.arduino.cc/arduino-uno-rev3>.
4. STM32F407VG – High-performance foundation line, ARM Cortex-M4 core with DSP and FPU, 1 Mbyte Flash, 168 MHz CPU, ART Accelerator, Ethernet, FSMC [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : https://www.st.com/content/st_com/en/products/microcontrollers-microprocessors/stm32-32-bit-arm-cortex-mcus/stm32-high-performance-mcus/stm32f4-series/stm32f407-417/stm32f407vg.html.
5. ESP8266EX Datasheet/Esspressif Systems. – 2018. – 24 s.
6. ATmega48A/PA/88A/PA/168A/PA/328/P [DATASHEET] /Atmel Corporation. – 2015. – 49 s.

Рецензія/Peer review : 14.5.2019 р.

Надрукована/Printed : 2.6.2019 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Говорущенко Т.О.

СИСТЕМА АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИНДРОМАЛЬНОЇ ДІАГНОСТИКИ ЗА ЛАПАРОСКОПІЧНИМИ ЗАХВОРЮВАННЯМИ

Метою статті є розробка структурної схеми системи автоматичної синдромальної діагностики за лапароскопічними зображеннями. Відмінністю запропонованої системи від систем подібного класу є наявність в структурі підсистеми підтримки рішень і модуля перевірки рішень і тактик лікування на адекватність реальної ситуації в стані здоров'я пацієнта. Було запропоновано базу даних, яка створена на основі медичної інформаційної системи, що дозволить зберігати великі обсяги архівів у стандарті DICOM-V.3.

Ключові слова: лапароскопічне зображення, лапароскопічна хірургія, автоматизована синдромальна діагностика.

A. V. LYASHENKO

Odessa National Medical University

SYSTEM OF AUTOMATED SYNDROMAL DIAGNOSTICS FOR LAPAROSCOPIC DISEASES

Laparoscopic surgery (LS) today is a successful alternative to open surgical intervention. In this case, the main technical condition for the success of laparoscopic surgery is to obtain a qualitative image of the operating field, as well as the possibility of adjusting the system to increase the image, reducing the risk of injury, errors during the operation. Since diagnostics of LS involves the use of combinational signs for the detection of pathology, the localization of the object by its features is determined by a set of descriptors in the form of a range of differences and is carried out by creating an algorithm for selecting the required descriptor. The process of recognizing an object in a video stream includes three successive stages of the functional diagram of IDEFO. The purpose of the article is to develop a structural scheme of the system of automatic syndromic diagnostics by laparoscopic images. The difference between the proposed system and systems of this class is the presence in the structure of the subsystem of decision support and the module of verification of decisions and treatment tactics on the adequacy of the actual situation in the patient's health. A database was created based on the medical information system, which would allow storing large volumes of archives in the DICOM-V.3 standard. The system of automated diagnostics of diseases of the abdominal cavity and small bowl allows to carry out a systematic analysis of the condition of the organs under investigation, to create databases, to detect a syndromic pathology in the early stages of the disease with an accuracy of up to 90% of diagnosed cases. The application of the developed system of automated recognition of laparoscopic images allows to timely diagnose the pathological process and to carry out medical measures, which provides increased efficiency of treatment of patients. At the same time, the reduction of false-positive results allowed to prevent surgical intervention in 64 of 91 patients (70.3%), and the reduction of false-negative diagnoses prevented the progressive development of the disease in 45 out of 140 (32.1%) patients, and according to expert assessment - to reduce the risk of postoperative complications in 65.1% of them, to accelerate the postoperative rehabilitation period by 30.5%, and to prevent the conversion of surgical intervention in 34.6% of the examined patients.

Keywords: laparoscopic image, laparoscopic surgery, automated syndrome diagnosis.

Вступ

Лапароскопічна хірургія (ЛХ) сьогодні є успішною альтернативою відкритим хірургічним втручанням [1, 2]. При цьому основною технічною умовою успіху ЛХ є отримання якісного зображення операційного поля, а також можливість регулювання системи для збільшення зображення, що зменшує ризик травматизації, помилок під час виконання операції [3, 4]. Перевагами ЛХ є мала травматичність, скорочення реабілітаційного періоду пацієнтів, сприятливий косметичний ефект втручання [2, 5–7].

Важливо пам'ятати, що лапароскопічна хірургія є природним продовженням традиційної абдомінальної хірургії, від якої відрізняється лише розміром доступу, прецизійністю маніпуляцій, інструментарієм і високотехнологічним обладнанням.

Аналіз літературного контенту

Розвиток технологій ЛХ відбувається в напрямку удосконалення мехатроніки при мініінвазивних втручаннях. Зокрема, на тлі мініатюризації самих лапароскопів, удосконалення оптичних систем, відбувається поліпшення цифрових властивостей кінцевих лапароскопічних пристроїв, а також в значній мірі збільшується рівень інформаційних технологій процесингу і аналізу лапароскопічних зображень (ЛЗ) [8, 9]. Крім того отримання оглядового ЛЗ є перевагою перед відкритими оперативними втручаннями, значний розвиток можливостей ЛХ сьогодні пов'язано з подальшим розвитком методів виділення необхідної інформації з відповідних зображень [10, 11, 12, 13]. Багато в чому це обумовлено певними недоліками ЛХ, а саме: відсутністю почуття глибини та реальних розмірів тканини, що ускладнює навігацію операційного поля. Тому одним з актуальних напрямків застосування інформаційних технологій в ЛХ є розвиток систем автоматизованої діагностики стану органів та тканин за ЛЗ [14].

Важливою проблемою залишається коректний вибір інформативних критеріїв – характеристик лапароскопічних зображень, які можуть бути застосовано для ідентифікації типових змін візуалізованої поверхні тканин [15]. Метою діагностики за цифровими відео зображеннями є його візуальні характеристики, такі як кількісні показники пікселів і інтенсивність градієнтів [4], просторово-часові властивості [16], а також комбінації окремих характеристик (контуру, форми, текстури) [11, 17, 18]. Однак, при використанні будь-яких із зазначених характеристик зображень в процесі діагностики інші інформативні критерії ігноруються, що можна вважати недоліком подібних технологій [19].

В той же час, до основних факторів, що стримують розвиток лапароскопічних технологій і систем слід віднести: недостатній рівень інвестицій в лапароскопічне обладнання і технології; недостатню кількість лікарів, які володіють відповідними лапароскопічними техніками і методиками; початковий рівень оснащення відео ендоскопічними і телекомунікаційними технологіями обласних і регіональних закладів охорони здоров'я (ЗОЗ); великий відсоток традиційних травматичних методик хірургічного втручання.

На інформаційному рівні існує достатньо питань, пов'язаних з обробленням біомедичних, в т.ч. і лапароскопічних відео зображень, серед яких слід відзначити: неоднозначність виділення інформаційних діагностичних ознак та їх надлишковість; неможливість встановлення точного діагнозу комплексів і систем, що зумовлено застосуванням ненормованих характеристик і критеріїв; низьку ефективність оброблення великих обсягів даних з заданою достовірністю.

Не завжди на відповідному апаратно-програмному рівні здійснюється структурно-функціональна організація оптичних обчислювально-вимірювальних каналів систем автоматичної діагностики; оптимізація технічних рішень базових функціональних елементів комплексів і систем; адекватне оцінювання розроблених математичних моделей і методів.

Постановка проблеми

Таким чином, підвищення ефективності та якості оброблення лапароскопічних зображень шляхом побудови моделей, методів і систем автоматизованої синдромальної діагностики є важливою та актуальною задачею, вирішення якої буде сприяти широкому та якісному впровадженню в клінічну практику закладів охорони здоров'я ефективних апаратно-програмних комплексів, систем і технологій мінімально інвазивної діагностики та лікування найпоширеніших захворювань.

Основний текст статті

При розробленні структурно-функціональної організації системи синдромальної діагностики необхідно враховувати:

- індивідуальні особливості патологічних синдромів;
- зміну ракурсу камери при візуалізації ділянки, що досліджується а саме, тканин органів черевної порожнини та малої миски;
- не стандартизоване зображення камери;
- мінливі умови зйомки.

Головними критеріями виявлення патологічного процесу при діагностиці виступають ознаки: кольору, контуру, текстури.

При розробленні системи слід відкорегувати ті особливості ЛЗ, які знижують ефективність застосування критерію:

- 1) нерівномірна освітленість області розпізнавання об'єкта при переходах із зони в зону з різною освітленістю, що змінює ознаки об'єкта;
- 2) можливі збої в стеженні, які виникають за рахунок перешкод, зумовлених з переміщенням хірургічних інструментів;
- 3) зміни ракурсу огляду камери, що веде до зміни форми і контуру об'єкта.

Структурно-функціональна організація системи лапароскопічної синдромальної діагностики включає модулі захвату ЛЗ 1, корегування 2, сегментації 3, виявлення ознак 4 і розпізнавання 5 (рис. 1).

До функцій першого та другого модулю – слід віднести захват ЛЗ стандартизованим каліброваним обладнанням аналіз відеокадру за рівнем якості передачі кольору, стандартизацію та препроцесинг зображення.

В третьому модулі – здійснюється генерація дескрипторів або ознак, коли за допомогою карти перинатальної площини формують регіони патологічного запалення та осередки виділених раніше синдромів. Кожна синдромальна патологія на ЛЗ класифікується згідно належності тому чи іншому класу.

Функції четвертого модуля – проведення навчання класифікатора згідно з виділеними ознаками, результатом якого є визначення системою якісного рівня побудованого класифікатора.

В п'ятому модулі здійснюється розпізнавання патологічних змін з можливістю запису значень до бази даних та корегування системи. Також здійснюється підключення до системи автоматизованої діагностики підсистеми підтримки прийняття рішень хірурга.

В процесі функціонування системи в модулях 3, 4 використовували комбінований підхід для опису осередкових запалень, за яким логічні та статистичні синдромальні ознаки були визначені як важливі критерії створення вибірки. Сформовані ознаки класифікації об'єктів надають системі додаткову гнучкість та адаптивність до різних форм діагностованих патологічних синдромів (рис. 2).

Принцип головного відбору ЛЗ на предмет наявності патологічних синдромів органів черевної порожнини і малої миски у жінок засновано на отриманні конкретної відповіді на питання про наявність об'єкта патології та відсутність його ураження.

Оскільки, діагностика ЛЗ передбачає застосування комбінаційних ознак для виявлення патології, то локалізація об'єкта за ознаками визначається набором дескрипторів у вигляді діапазону відмінності і здійснюється шляхом створення алгоритму вибору необхідного дескриптора.

Процес розпізнавання об'єкта на відеопотоці включає три послідовних етапи функціональної діаграми IDEF0 (рис. 3). Першим кроком функціональної діаграми є створення вектору ознак характерних точок ЛЗ. Незалежно від масштабу дій всі функції мають чотири потоки, які закріплені за кожною стороною

функціонального блоку.

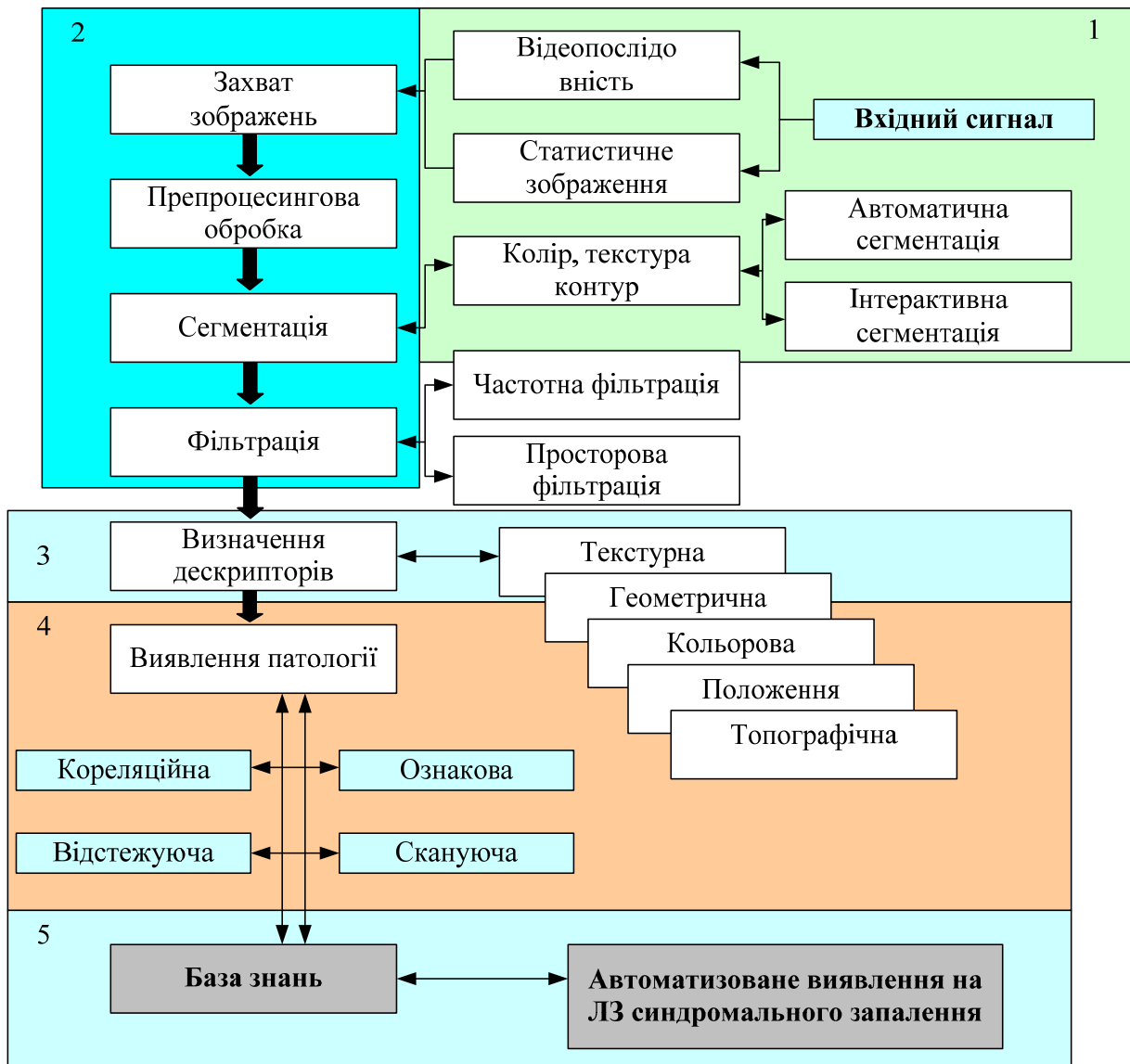


Рис. 1. Структурно-функціональна організація системи автоматичної синдромальної діагностики



Рис. 2. Основні функціональні елементи системи виявлення патології на ЛЗ

Під стрілкою зліва розуміємо вхід, коли до системи потрапляє зображення з невідомими об'єктами дослідження. Механізмом вхідного потоку даних являється алгоритм перетворення зображення в кольорову модель HSV за допомогою алгоритму виділення об'єкту за кольоровими, контурними та текстурними характеристиками.

Крок 1. Застосовування системи аналізу вхідних даних забезпечило виділення вектору характерних точок і формування ознак патологічних змін. Алгоритми аналізу представлені механізмами: бінаризації, знаходження контуру, виділення кольору, алгоритм знаходження текстурних ознак. На виході першого кроку маємо сукупність розрахованих даних відносно з генерованих ознак.

Крок 2. Дані, які розраховані на 1-му кроці, отримані на вході системи класифікації ознак. Використовуючи класифікатор розділимо ознаки на 7 класів розпізнавання об'єктів на предмет наявності патологічних змін. На виході системи класифікації отримуємо набір значень розпізнавання об'єкту свого класу та вірогідність розпізнавання захворювання.

Крок 3. Заключна частина системи розпізнавання об'єктів патологічних змін вміщує в себе алгоритм відношення характеристик захворювання до певного класу. Тим самим за допомогою алгоритму детекції виділяємо знайдені об'єкти на початковому зображенні. Вихідні данні являють собою еталонні зображення з виділеними об'єктами патологічних захворювань.

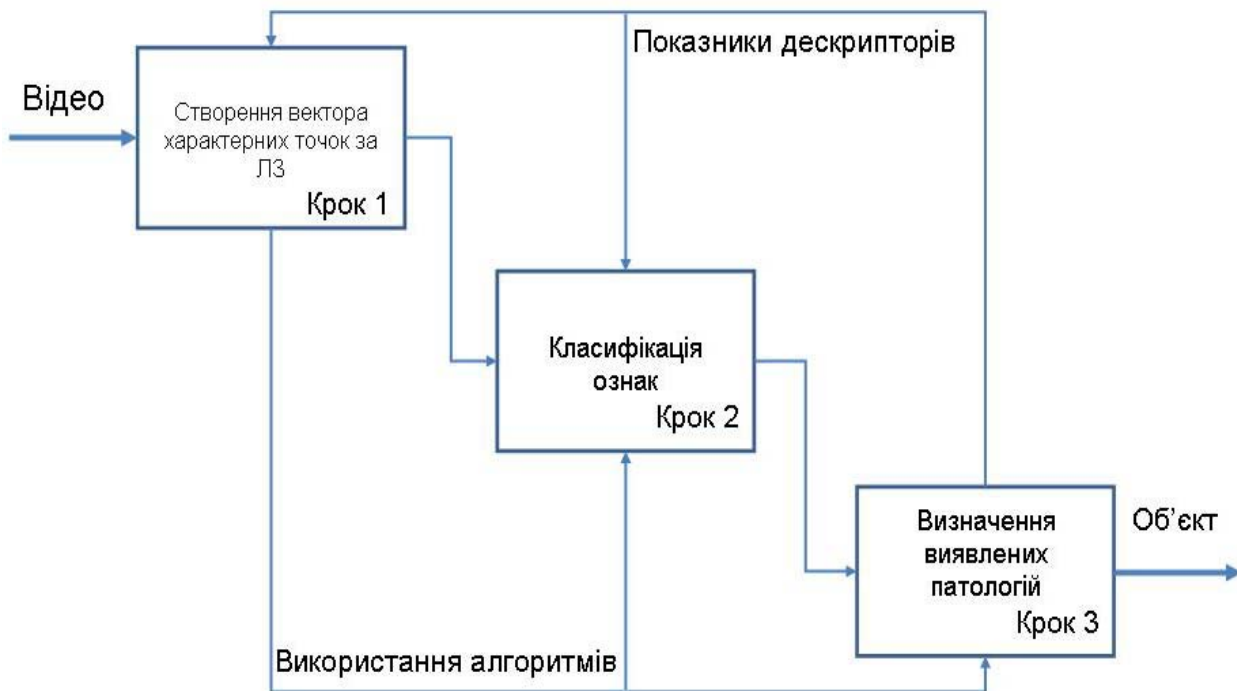


Рис. 3. Функціональна діаграма розпізнавання об'єктів на відео зображенні (IDEF0 діаграма)

Структурна схема системи автоматичної синдромальної діагностики за лапароскопічними зображеннями представлена на рис. 4.

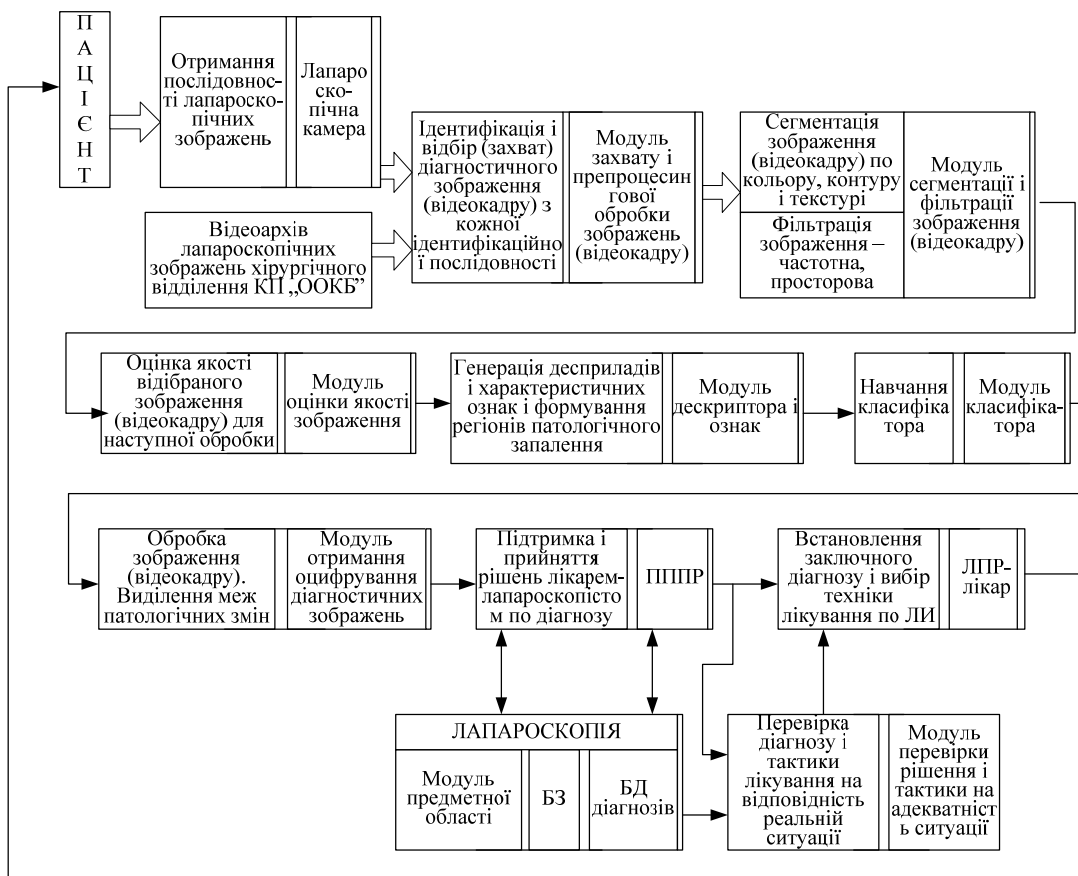


Рис. 4. Структурно-функціональна схема системи автоматичної синдромальної діагностики по лапароскопічним зображенням

Її відмінністю від систем подібного класу є наявність в структурі підсистеми підтримки рішень і модуля перевірки рішень і тактик лікування на адекватність реальній ситуації в стані здоров'я пацієнта. ПППР побудована за принципами нечіткої логіки і включає в себе блоки настроювання і зберігання функції належності, базу еталонних лапароскопічних зображень (БД), блок введення інформації та її попередньої обробки, блок нечіткого виводу, блоки формування і поповнення баз знань.

База еталонних зображень створена з використанням відеоархіву хірургічного відділення КП «Одеська обласна клінічна лікарня» за період з 2010 по 2017 р.

У тестовій вибірці було використано 632 відеопослідовності, з яких взято 12953 еталонних зображень; 377 відеофайлів оброблених (з архіву – у встановленому у часі режимі); 255 відеофайлів безпосередньо під час хірургічного втручання (в режимі реального часу).

База створена на основі медичної інформаційної системи PACS [20], що дозволяє зберігати великі обсяги архівів у стандарті DICOM-V.3.

Для постановки діагнозу в роботі проведено систематизацію даних, для чого і побудовано вищенаведену базу даних *MySQL*, яка задовольняє вимогам зберігання, змін та отримання нових даних і використовує технологію *Data Mining*. При переході до вкладки «База» дані пацієнта зберігаються разом з функцією збереження зображення і відео (рис. 5) в PACS системі у форматі DICOM 3.0.

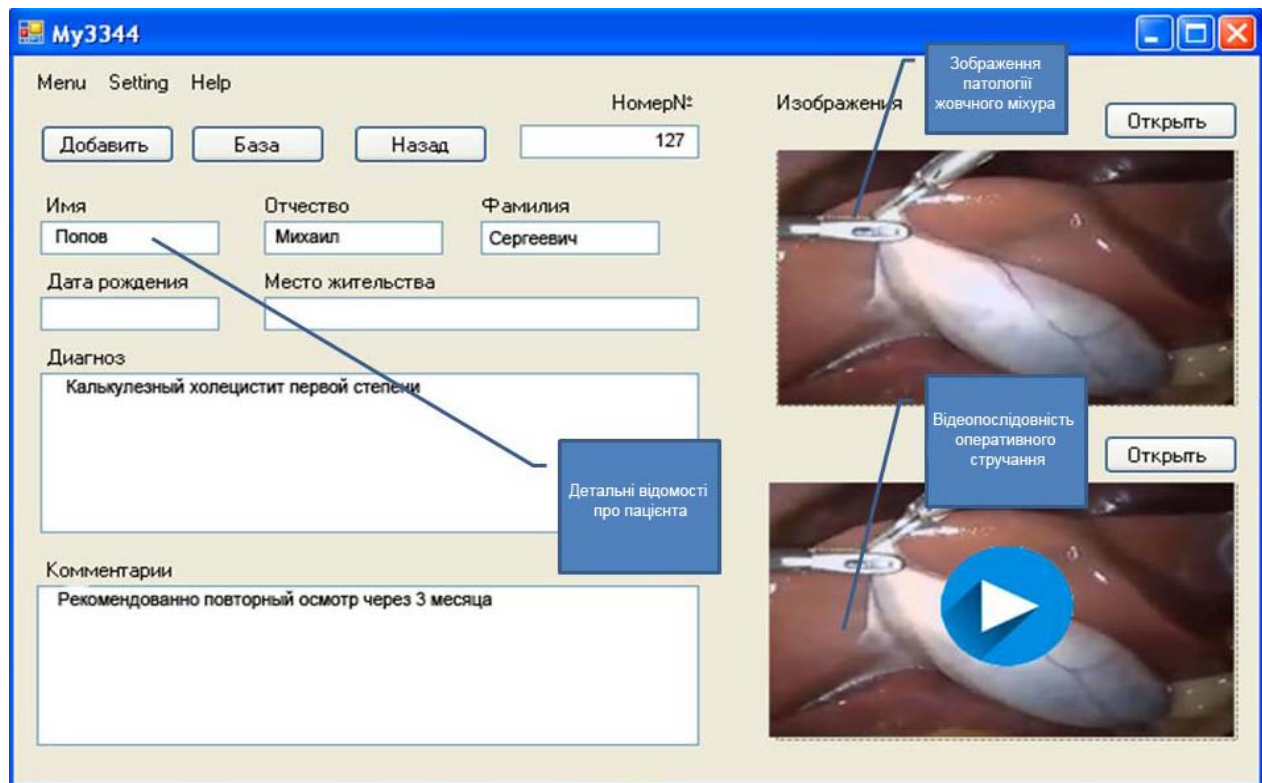


Рис. 5. Інтерфейс бази даних пацієнтів

Висновки

1. Система автоматизованої діагностики захворювань органів черевної порожнини і малої миски дозволяє проводити системний аналіз стану досліджуваних органів, створювати бази даних, виявляти синдромальну патологію на ранніх стадіях захворювання з точністю до 90% діагностованих випадків.

2. Застосування розробленої системи автоматизованого розпізнавання лапароскопічних зображень дозволяє своєчасно діагностувати патологічний процес і здійснити лікувальні заходи, що забезпечує підвищення ефективності лікування пацієнтів. При цьому зменшення хибно-позитивних результатів дозволило попередити оперативні втручання у 64 із 91 обстежених пацієнтів (70,3%), а зниження хибно-негативних діагнозів дозволило запобігти прогресивному розвитку захворювання у 45 із 140 (32,1%) пацієнтів, а відповідно до експертної оцінки – зменшити ризик виникнення післяопераційних ускладнень у 65,1% з них, прискорити період післяопераційної реабілітації – у 30,5%, а також запобігти конверсії оперативного втручання у 34,6% обстежених пацієнтів.

Література

1. Dray X. The future of gastrointestinal therapeutic endoscopy: NOTES / X. Dray, P. Marteaux / Gastroenterologie Clinique et Biologique. – 2009. – Vol. 33, N 8–9. – P. 758–766.
2. Kano N. The future of NOTES from the conservative point of view / N. Kano // Journal of Hepato-Biliary–Pancreatic Surgery. – 2009. – Vol. 16, N 3. – P. 288–291.
3. Kati D., A. L. Wekerle, F. Gartner, H. Kennigott, B. P. Mller-Stich, R. Dillmann, S. Speidel. Knowledge-

driven formalization of laparoscopic surgeries for rule-based intraoperative context-aware assistance. In IPCAI, volume 8498 of LNCS, P. 158–167.

4. Blum T., H. Feussner, N. Navab. Modeling and segmentation of surgical workflow from laparoscopic video. In MICCAI, volume 6363 of LNCS, pages 400–407, 2010.

5. Баязитов Н.Р. Дисторсия и хроматическая абберация как факторы диагностической информативности лапароскопических изображений / Н.Р. Баязитов, Л.С. Годлевский, А.В. Ляшенко // Интегративна антропология. – 2011. – № 1. – С. 64–69.

6. Баязитов Н.Р. Информативность лапароскопических изображений при диагностической минилапароскопии / Н.Р. Баязитов, Л.С. Годлевский // Журнал клинической информатики и телемедицины. – 2010. – № 1. – С. 50–56.

7. Баязитов Н.Р. Телехирургия: новые возможности лапароскопических технологий / Н.Р. Баязитов // Досягнення біології та медицини. – 2008. – № 2 (12). – С. 84–98.

8. Winsberg F., Elkin M., Macy Jr J., Bordaz V., Weymouth W. Detection of Radiographic Abnormalities in Mammograms by Means of Optical Scanning and Computer Analysis 1. Radiology. 1967; 89(2): 211-5.

9. Padoy N., T. Blum, S.A. Ahmadi, H. Feussner, M. O. Berger, N. Navab. Statistical modeling and recognition of surgical workflow. Medical Image Analysis, 16(3):632–641, 2012.

10. Xu Y., Ji H., Fermuller C., editors. A projective invariant for textures. Computer Vision and Pattern Recognition, 2006 IEEE Computer Society Conference on; 2006: IEEE. – P. 145–158

11. Гольцев А.Д. Алгоритм последовательного определения текстурных признаков, характеризующих однородные текстурные области, для задачи сегментации изображений / А.Д. Гольцев // Кибернетика и вычислительная техника. – 2013. – Вып. 173. – С. 25–34.

12. Довбиш А.С. Оптимізація словника ознак розпізнавання інтелектуальної системи керування / А. С. Довбиш, О.В. Коробченко // Інформатика, математика, автоматика : матеріали та програма науково-технічної конференції, м. Суми, 22–27 квітня 2013 р. / відп. за вип. С.І. Проценко. – Суми : СумДУ, 2013. – С. 37.

13. Довбиш А.С. Основи теорії розпізнавання образів : навч. посіб. : у 2 ч. Ч. 1 / А.С. Довбиш, І.В. Шелехов. – Суми : СумДУ, 2015. – 109 с.

14. Гуревич Н. А. лапароскопическая диагностика и лечение острых хирургических заболеваний органов брюшной полости : автореф. канд. мед. наук по спец. 14.00.27 / Гуревич Н. А. – Минск, 2007. – 25 с.

15. Neophytou M.S., V. Tanos, I.P. Constantinou, M.S. Pattichis, E.C. Kyriacou, and C.S. Pattichis, “Computer–Aided Diagnosis in Hysteroscopic Imaging”, IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics, vol. 19, no. 3, pp. 1129–1136.

16. Zappella L., B. Bjar, G. Hager, R. Vidal. Surgical gesture classification from video and kinematic data. Medical Image Analysis, 17(7):732 – 745, 2013.

17. Lalys F., D. Bouget, L. Riffaud, P. Jannin. Automatic knowledge-based recognition of low-level tasks in ophthalmological procedures. IJCARS, 8(1): 39–49, 2012.

18. Гриценко В.И. Медицинские информационные системы как элементы единого информационного медицинского пространства / В.И. Гриценко, Л.М. Козак, А.С. Коваленко, А.А. Пезенцали, Н.С. Рогозинская, В.Г. Осташко // Кибернетика и вычислительная техника. – 2013. – Вып. 174. – С. 30–46.

19. Daniel O'Neill. Video Analytics Software And Intelligent Light Controls Help Satisfy Sustainability, Security [Електронний ресурс] / O'Neill. Daniel // Facilitiesnet – 2009 – Режим доступу : <http://www.facilitiesnet.com/security/article/Video-Analytics-Software-and-Intelligent-Light-Controls-Help-Satisfy-Sustainability-Security--11350>

20. Иванов С. Э. Лапароскопия яичников. Диагностика удаление и методы реабилитации [Електронний ресурс] / Сергей Эдуардович Иванов // www.polimed.com. – 2015. – Режим доступу : <http://www.polimed.com/articles-laparoskopija-jaichnika-diagnosticheskaja.htm>.

References

1. Dray X. The future of gastrointestinal therapeutic endoscopy: NOTES / X. Dray, P. Marteaux / Gastroenterologie Clinique et Biologique. – 2009. – Vol. 33, N 8–9. – P. 758–766.

2. Kano N. The future of NOTES from the conservative point of view / N. Kano // Journal of Hepato–Biliary–Pancreatic Surgery. – 2009. – Vol. 16, N 3. – P. 288–291.

3. Kati D., A. L. Wekerle, F. Gartner, H. Kenngott, B. P. Mller-Stich, R. Dillmann, S. Speidel. Knowledge-driven formalization of laparoscopic surgeries for rule-based intraoperative context-aware assistance. In IPCAI, volume 8498 of LNCS, P. 158–167.

4. Blum T., H. Feussner, N. Navab. Modeling and segmentation of surgical workflow from laparoscopic video. In MICCAI, volume 6363 of LNCS, pages 400–407, 2010.

5. Bayazitov N.R. Distorsiya i hromaticheskaya aberratsiya kak faktory diagnosticheskoy informativnosti laparoskopicheskikh izobrazhenij / N.R. Bayazitov, L.S. Godlevskij, A.V. Lyashenko // Integrativna antropologiya. – 2011. – № 1. – С. 64–69.

6. Bayazitov N.R. Informativnost laparoskopicheskikh izobrazhenij pri diagnosticheskoy minilaparoskopii / N.R. Bayazitov, L.S. Godlevskij // Zhurnal klinicheskoy informatiki i telemeditsiny. – 2010. – № 1. – С. 50–56.

7. Bayazitov N.R. Telehirurgiya: novye vozmozhnosti laparoskopicheskikh tehnologij / N.R. Bayazitov // Dosyagnennya biologiyi ta medicini. – 2008. – № 2 (12). – С. 84–98.

8. Winsberg F., Elkin M., Macy Jr J., Bordaz V., Weymouth W. Detection of Radiographic Abnormalities in Mammograms by Means of Optical Scanning and Computer Analysis 1. Radiology. 1967; 89(2): 211-5.

9. Padoy N., T. Blum, S.A. Ahmadi, H. Feussner, M. O. Berger, N. Navab. Statistical modeling and recognition of surgical workflow. *Medical Image Analysis*, 16(3):632–641, 2012.
10. Xu Y., Ji H., Fermuller C., editors. A projective invariant for textures. *Computer Vision and Pattern Recognition, 2006 IEEE Computer Society Conference on*; 2006: IEEE. – P. 145–158
11. Golcev A.D. Algoritm posledovatel'nogo opredeleniya teksturnykh priznakov, harakterizuyushih odnorodnye teksturnye oblasti, dlya zadachi segmentatsii zobrazhenij / A.D. Golcev // *Kibernetika i vychislitel'naya tekhnika*. – 2013. – Vip. 173. – S. 25–34.
12. Dovbysh A.S. Optymizatsiia slovnyka oznak rozpoznavannia intelektualnoi systemy keruvannia / A. S. Dovbysh, O.V. Korobchenko // *Informatyka, matematyka, avtomatyka : materialy ta prohrama naukovo-tekhnichnoi konferentsii, m. Sumy, 22–27 kvitnia 2013 r. / vidp. za vyp. S.I. Protsenko*. – Sumy : SumDU, 2013. – S. 37.
13. Dovbysh A.S. Osnovy teorii rozpoznavannia obraziv : navch. posib. : u 2 ch. Ch. 1 / A.S. Dovbysh, I.V. Shelekhov. – Sumy : SumDU, 2015. – 109 s.
14. Gurevich N. A. laparoskopicheskaya diagnostika i lechenie ostrih hirurgicheskikh zabolevanij organov bryuzhnoj polosti : avtoref. kand. med. nauk po spec. 14.00.27 / Gurevich N. A. – Minsk, 2007. – 25 s.
15. Neophytou M.S., V. Tanos, I.P. Constantinou, M.S. Pattichis, E.C. Kyriacou, and C.S. Pattichis, “Computer–Aided Diagnosis in Hysteroscopic Imaging”, *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, vol. 19, no. 3, pp. 1129–1136.
16. Zappella L., B. Bjar, G. Hager, R. Vidal. Surgical gesture classification from video and kinematic data. *Medical Image Analysis*, 17(7):732 – 745, 2013.
17. Laly's F., D. Bouget, L. Riffaud, P. Jannin. Automatic knowledge-based recognition of low-level tasks in ophthalmological procedures. *IJCARS*, 8(1): 39–49, 2012.
18. Gricenko V.I. Medicinskie informacionnye sistemy kak elementy edinogo informacionnogo medicinskogo prostranstva / V.I. Gricenko, L.M. Kozak, A.S. Kovalenko, A.A. Pezencali, N.S. Rogozinskaya, V.G. Ostashko // *Kibernetika i vychislitel'naya tekhnika*. – 2013. – Vip. 174. – S. 30–46.
19. Daniel O'Neill. Video Analytics Software And Intelligent Light Controls Help Satisfy Sustainability, Security [Elektronnij resurs] / O'Neill. Daniel // *Facilitiesnet* – 2009 – Rezhim dostupu : <http://www.facilitiesnet.com/security/article/Video-Analytics-Software-and-Intelligent-Light-Controls-Help-Satisfy-Sustainability-Security--11350>
20. Ivanov S. E. Laparoskopija yaichnikov. Diagnostika udalenie i metodi rehabilitatsii [Elektronnyj resurs] / Sergej Eduardovich Ivanov // www.polismed.com. – 2015. – Rezhim dostupu : <http://www.polismed.com/articles-laparoskopija-jaichnika-diagnosticheskaja.htm>.

Рецензія/Peer review : 24.5.2019 р.

Надрукована/Printed : 4.6.2019 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Кичак В.М.

О.М. БЕЗВЕСІЛЬНА

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»

О.В. ПЕТРЕНКО, М.В. ІЛЬЧЕНКО

Публічне Акціонерне Товариство «Науково-виробниче об'єднання «Київський завод автоматики»

ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ПРИЛАДОВИХ СТАБІЛІЗАТОРІВ

В роботі розглянуто шляхи підвищення точності та швидкодії стабілізаторів за рахунок введення в контури управління нових інформаційних сенсорів для виміру кутової швидкості замість електромеханічних гіротахометрів. В якості нових інформаційних сенсорів розглянуто сенсори, виготовлені за новими технологіями – коріолісові вібраційні гіроскопи, оптоволоконні гіроскопи та гіроскопи MEMS. Для порівняння наведено дані за технічними характеристиками як електромеханічних гіротахометрів, так запропонованих нових сенсорів для виміру кутової швидкості блоку озброєння. За допомогою математичного моделювання проаналізовано вплив на точність та швидкодію стабілізаторів таких параметрів, як смуга пропускання, частота інформаційного обміну. Аналіз впливу проводився за допомогою перевірки реакції стабілізатора на динамічну похибку стабілізації при використанні різних інформаційних сенсорів кутової швидкості. Порівняння похибок стабілізації у вертикальному каналі при дискретності обчислень 1,7 мс і 1,0 мс показало, що при тривалості обчислень 1,0 мс стала похибка при розгоні і русі виробу з постійною кутовою швидкістю у порівнянні з результатами при дискретності 1,7 мс, у два рази менше, а після дії імпульсних впливів блок озброєння при дискретності 1,0 мс повертається у вихідне положення з похибкою, яка не перевищує 0,1 кут. хв. Встановлено, що частота формування вихідних сигналів ДУС має бути не менш 1000 Гц і смуга пропускання – не менш 100 Гц.

Ключові слова: гіроскоп, стабілізатор, датчики кутової швидкості.

E.N. BEZBESILNA

National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorski»

O.V. PETRENKO, M.V. ILCHENKO

Public joint stock company «Research-and-Production association «Kyiv automatics plant»

WAYS OF INCREASE OF EXACTNESS OF STABILIZERS

The ways of increase of exactness and fast-acting of stabilizers of the easy reserved technique are in-process considered due to introduction to the contours of management of new informative touch-controls for measuring of angular rate instead of electromechanics rate gyroscopes. To increase the stripe of key-in of pickoffs, stabilizers of armament, electromechanics rate gyroscope, not maybe, coming from principle of maintenance of his principle of action is indemnification of gyroscopic moment by the spring of torsion. An increase of fast-acting of electromechanics: rate gyroscope is maybe at application of: rate gyroscope of compensative type, in that indemnification of gyroscopic moment is executed by the special electric sensor of moment - electric spring. As new informative touch-controls the touch-controls made for to NT are considered - coriolis oscillation gyroscopes, fiber-optic gyroscopes and gyroscopes of MEMS. For comparison it is resulted date for to technical descriptions, as electromechanics, such offer new touch-controls for measuring of angular rate of block of armament. By means of mathematical design influence is analysed on exactness and fast-acting of stabilizers of such parameters, as a stripe of key-in, frequency of informative exchange. The analysis of influence was conducted by means of checking of reaction of stabilizer for the dynamic error of stabilizing at the use of different informative touch-controls of angular rate. Comparison of stabilizing errors in a vertical channel at discreteness of calculations of 1,7 ms and 1,0 ms showed that at duration of calculations of 1,0 ms an error became at an acceleration and motion of good with a permanent angular rate in comparing to the results at discreteness of 1,7 ms, in two times less than, and after the action of impulsive influences the block of armament at discreteness of 1,0 ms goes back into initial position with an error that does not exceed a 0,1 angle. min. It is set that frequency of forming of initial signals of sensor angular rate must be no less 1000 Hertz and stripe of key-in - no less 100 Hertz.

Keywords: rate gyroscope, stabilizer, sensors of angular rate.

Вступ

Сучасний стан вітчизняного виробництва різноманітних систем характеризується значним підвищенням вимог до точності, швидкодії систем керування та стабілізації систем позиціонування, у тому числі, при експлуатації у складних умовах.

Сучасні рухомі об'єкти мають значно більші швидкості, на них діють значно більші переважання та неконтрольовані механічні збурення (удари, вібрації) (табл. 1) [1]. Тому вимоги до точності засобів та методів вимірювання визначених вище механічних величин стабілізаторів озброєння стали значно вищими.

Науково-технічний прогрес у галузі приладових комплексів стабілізаторів (КС) потребує удосконалення компонентів, елементної бази системи керування, використання сучасних цифрових приладів вимірювання кутових швидкостей для покращення тактико-технічних характеристик КС, які мають прийти на заміну аналоговим приладам з забезпеченням максимально можливої мінімізації собівартості апаратури.

Аналіз приладового складу, структури та динамічних параметрів блоків відомих цифрових стабілізаторів [2] показав, що для підвищення точності стабілізації та швидкодії резервів немає.

Швидкодія КС характеризується смугою пропускання частот, часом швидкодії електродвигунів і підсилювачів, моментом навантаження на електроприводи, а також, дискретністю за часом цифрового обчислювача.

**Середні параметри коливань корпусу танків при русі
по середньо пересіченій місцевості зі швидкістю до 20 км/год**

№	Види коливань	Кутові коливання		
		Амплітуда, град	Швидкість, град/секунд	Частота, Гц
1	Поздовжні коливання	2,5	8,25	1,1
2	Горизонтальні коливання	1,2	1,6	0,6
3	Поперечні коливання	1,8	6,3	0,8

Збільшити смугу пропускання чутливих елементів КС, електромеханічних гіротахometrів, не можливо, виходячи з принципу збереження його принципу дії – компенсація гіроскопічного моменту пружиною торсіона.

Підвищення швидкодії електромеханічних гіротахometrів можливо при застосуванні гіротахometrів компенсаційного типу, в яких компенсація гіроскопічного моменту виконується спеціальним електричним датчиком моменту – електричною пружиною.

Один із шляхів підвищення точності КС – заміна традиційних електромеханічних гіротахometrів, які мають аналогову вихідну інформацію, на новітні твердотільні гіротахometrи з цифровою вихідною інформацією та значно розширеною смугою пропускання.

Використання в якості чутливих елементів електромеханічних гіротахometrів, на сьогоднішній день, у багатьох випадках виправдано в зв'язку з низьким рівнем шумів, гарними динамічними характеристиками, задовільними характеристиками по точності, напрацьованими технологічними процесами виготовлення. Але механічні гіротахometrи мають ряд недоліків: час готовності до роботи визначається часом розгону гіромотора, низька смуга частот, вихідні сигнали видаються в аналоговому вигляді, незадовільна стійкість до механічних ударних факторів, необхідність додаткового перетворювача енергії для живлення гіромоторів.

Тому найбільшу увагу представляють малогабаритні гіротахometrи, які побудовані без використання обертаючих та рухомих частин. Серед них коріолісовий вібраційний гіроскоп (КВГ), оптоволоконні гіроскопи (ВОГ) та гіроскопи MEMS.

Мета роботи – дослідження можливості підвищення точності та швидкодії стабілізаторів озброєння ЛБМ за рахунок застосування нових чутливих елементів – датчиків кутової швидкості (ДКШ).

З метою вивчення можливості підвищення точнісних характеристик стабілізатора озброєння, було проведено моделювання з використанням як традиційного електромеханічного сенсора кутової швидкості (ДКШ) ГТ, так і твердотільного гіроскопа нового типу – Коріолісового вібраційного гіроскопа (КВГ).

КВГ відрізняються від традиційних електромеханічних гіроскопів підвищеною надійністю та довговічністю (табл. 2), тому, що не мають обертаючих частин, широкую смугу пропускання та стійкість до механічних впливів.

Оцінка середнього часу напрацювання на відмову (СЧНВ) проводилась по даним випробувань багатьох КВГ з урахуванням коефіцієнта Е навколишнього середовища у відповідності з стандартами США MIL-HDBK-217FNotice2 [3].

Таблиця 2

Дані по середньому часу напрацювання на відмову КВГ

Умови довілля з застосування	СЧНВ Дов. імовірність 99% годин (років)	СЧНВ Дов. імовірність 99,9% годин (років)
Наземні рухомі об'єкти, E=4,0	408042 (46)	271929 (31)
Морські об'єкти в приміщенні, E=4,0	408042 (46)	271929 (31)
Літаки з екіпажем, грузом, винищувачі, E=5,0	326434(37)	217543 (24)

Вказані сенсори мають широку область використання, у тому числі: для стабілізації платформ з установленими на них вимірювальними пристроями та в системах управління рухомими об'єктами різного класу, у вимірювальних блоках для інерціальної навігації. Технічні характеристики сенсорів кутової швидкості наведено у відповідно ГТ46 (табл. 3) [3], КВГ(табл. 4) [4], ВОГ ВГ910Ф (табл. 5) [5], MEMS G20-75-100 (табл. 6) [6, 7].

Таблиця 3

Технічні характеристики ГТ46

№	Параметри	Одиниці виміру	Значення
1	Діапазон кутових швидкостей	град/с	± 50
2	Смуга частот	Гц	30
3	Поріг чутливості	град/с	0,015
4	Масштабний коефіцієнт (МК)	В•с/град	0,17
5	Асиметрія вихідної характеристики	%	10
6	Величина сигналу на нерухомій основі	мВ	100
7	Зона застою	мВ	20
8	Перехресна чутливість	мВ•с/град	1
9	Власна частота	Гц	20 ÷ 25
10	Живлення від джерела 3-фазного струму	В/Гц	36/400
11	Струм споживання	А	0,4
12	Час готовності	с	120
13	Час безперервної роботи	год	6
14	Габаритні розміри	мм	190 x 124 x 86
15	Маса	кг	2,3

Із всіх технічних характеристик ДКШ виберемо найбільш привабливі тим, що вони мають найбільші значення у порівнянні з ГТ46 – це смуга частот, дискретність обміну інформацією та можливість покращити показники точності і швидкодії стабілізатора.

Таблиця 4

Технічні характеристики КВГ

№	Параметри	Одиниці виміру	Значення
1	Діапазон кутових швидкостей	град/с	± 200, ±400
2	Смуга частот	Гц	не менше 100
3	Масштабний коефіцієнт (МК)	1/(град/сек)*	0,04
4	Нормальні умови +25 °С		
5	Лінійність МК	%	≤0,04
6	Повторюваність МК від вкл. до вкл. від дня до дня	%	≤0,03
7	Повторюваність зміщення нуля	град/час	5
8	Стабільність зміщення нуля (1σ)	град/час	0,2-1
9	Шум (1σ)	град/час	0,003
10	Температурний діапазон від (-40 до +75)°С		
11	Повторюваність зміщення нуля	град/час	5
12	Стабільність зміщення нуля	град/час	<5
13	Випадковий шум (1σ)	град/час	0,01
14	Температурна стабільність МК (включаючи гістерезис та градієнт температур, 1	%	0,2
15	Умови експлуатації		
16	Робочий температурний діапазон	°С	-40 ÷ +75
17	Температура зберігання	°С	-50 ÷ +95
18	Випадкова вібрація	g	> 15
19	Удар	g, мс	> 400
20	Середнє напруження на відмову (СНВ)	ч	> 500000
21	Параметри живлення		
22	Напруга живлення	В	+(15 ÷ 30)
23	Споживана потужність	Вт	<2,5
24	Інтерфейс	RS-422, RS-485	
25	Габарити: 1. чутливий елемент (ЧЕ) + Ел. Блок 2. єдина конструкція	1. ЧЕ: Ø40×h27 мм Ел. Блок 50×50×25 2. 72×62×58 мм	
26	Маса:	1. 200 гр. 2. 400 гр.	
27	* Вихідний код /МК = град/сек/		

Таблиця 5

Технічні характеристики MEMS G20-075-100

№	Параметри	Одиниці виміру	Значення
1	Діапазон кутових швидкостей	град/с	± 75
2	Смуга частот	Гц	100
3	Коефіцієнт передачі	мВ/(град/сек)	15
4	Випадковий шум	град/сек/√Гц	0,05
5	Точність виставки	мрад	± 17,5
6	Час готовності	с	н/д
7	Стійкість до ударів	g	500
8	Температурний діапазон	°С	-40 ÷ +85
9	Маса	г	30
10	Живлення	В	н/д

Таблиця 6

Технічні характеристики ВОГ910Ф

№	Параметри	Одиниці виміру	Значення мін/макс	
1	Масштабний коефіцієнт(МК), (+20°С)	мВ/(град/сек)	5,5/7,5	
2	Стабільність МК, СКВ при постійній температурі, 1 СКВ	%	-/0,2	
3	Температурний коефіцієнт МК	% / * °С	0/0,1	
4	Зсув нуля	мВ	-/0,4	
5	Стабільність зсуву нуля при постійній температурі, 1 СКВ	град/год	-/4	
6	Температурний коефіцієнт зсуву нуля	мкВ/°С	-/3	
7	Діапазон вимірюємих швидкостей	°/сек	370	
8	Спектральна платність шумової складової вихідного сигналу	мкВ/√Гц	-/6	
9	Час готовності	сек	-/0,2	
10	Струм живлення +5В (20 °С)	мА	-/190	
11	Смуга частот по рівню 0,7	кГц	0,4/-	
12	Швидкість порту (по умовчання)	кБод	-	
13	Маса (приблизно)	г	120	
14	Габарити (без фланців та роз'єму) 82,3×82,3×20	мм	82,3×82,3×20	
15	Температура робоча (Температура гранична (2 години)	°С	-40(-55) ÷ 70(85)	
16	Габарити (без фланців та роз'єму 82,3×82,3×20	мм	82,3×82,3×20	
17	Температура робоча	°С	-40 ÷ +70	
18	Температура гранична (2 години)	°С	-55 ÷ +85	
19	Вібрація, СКВ	g (Гц)	12 (20...2000)	
20	Удари	мс (g)	1 (150)	
21	Параметри надійності	Середнє напрацювання на відмову	час	60000
		Строк служби (прогноз)	років	15

* - паспортні параметри: МК, струм споживання +5В (20°С)

Експериментальна частина

Методом математичного моделювання було проведено оцінки впливу смуги пропускання та дискретності обчислювальних операцій гіротахметра ГТ46 та MEMS G20-075-100 зі смугою пропускання

100 Гц і ВОГ ВГ910Ф зі смугою пропускання 450 Гц. При моделюванні використовувались математичні моделі гіроскопічних вимірювачів швидкості ГТ46, КВГ, MEMS G20-075-100, які представлені на рис. 2. У процесі моделювання похибка гіротахметра ГТ46 враховувалася у вигляді ланки, що моделює білий шум зі спектральною щільністю $1,44 \cdot 10^{-6} / 100$ відповідної середньоквадратичної похибки (рис. 2 г) Band-limited White Noise). Дослідження можливості підвищення точності стабілізатора при використанні гіротахметра ГТ46 було проведено з урахуванням таких основних положень [8]:

1. З метою покращення характеристик щодо точності стабілізатора озброєння, було проведено оптимізацію коефіцієнта передачі гіротахметра ГТ46 і постійної часу інтегратора, а також коефіцієнтів, що настроюються, у контурах керування.

Оптимізація проводилася на підставі мінімізації **Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.**-норми замкнутої передатної функції лінійної моделі стабілізатора

Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования., (1)
де **Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.** – передатна функція замкнутої системи стабілізації,

* – символ комплексно-спряженої матриці.

Обраний критерій забезпечує високу точність процесів керування з урахуванням можливості зміни параметрів системи.

В основу аналізу результатів моделювання було покладено оцінку динамічної похибки стабілізатора, його реакцію на імпульсний вплив.

Оцінка динамічної похибки стабілізатора проводилася на підставі дослідження реакції на гармонійний сигнал, що подається на вхід гіротахометра ГТ46 (рис. 1). Амплітуда та частота зміни сигналу відповідає коливанням корпусу виробу з амплітудою $2,5^\circ$ й частотою 0,8 Гц.

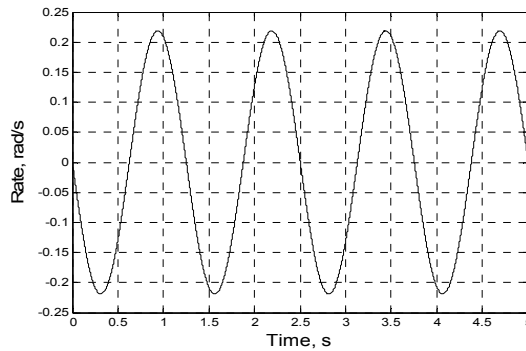


Рис. 1. Гармонійний вплив, що задається на вході гіротахометра ГТ46

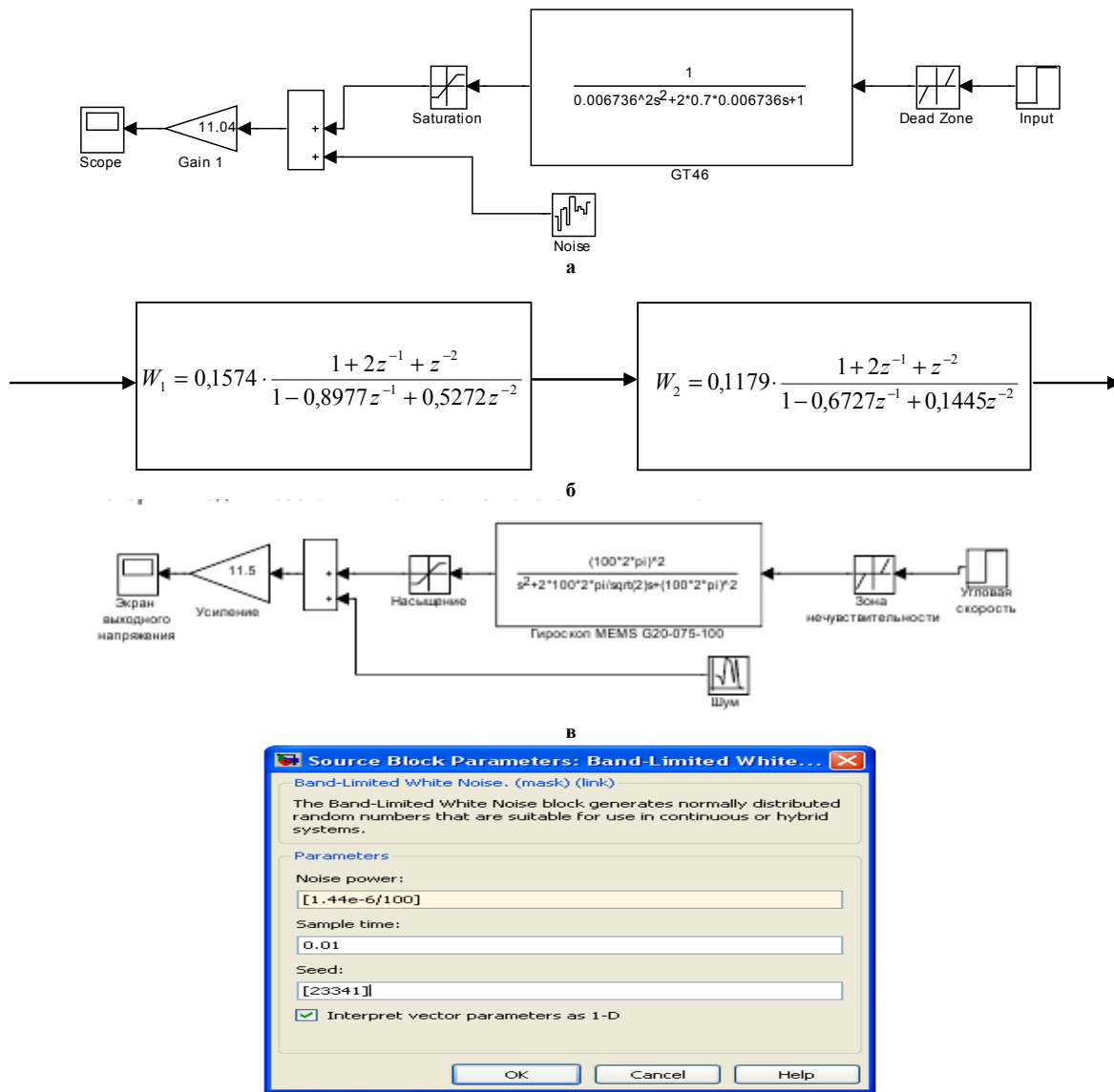


Рис. 2. Математичні моделі ДКШ: а – ГТ46, б – КВГ, в – MEMS G20-075-100, г – Band-limited White Noise

Оцінка імпульсного впливу проводилася на підставі дослідження реакції на послідовність імпульсів, що подаються на вхід гіротахометра ГТ46 (рис. 1). Параметри імпульсних впливів приймалися з урахуванням стрільбових випробувань стабілізатора СВУ-500-4Ц-01. Тривалість імпульсу 5,0 мс з

амплітудою 0,5 рад/с відповідає вихідному сигналу ГТ на рівні 6В.

Порівняння похибок стабілізації у вертикальному каналі при дискретності обчислень 1,7 мс і 1,0 мс показало, що при тривалості обчислень 1,0 мс стала похибка при розгоні і русі з постійною кутовою швидкістю, у порівнянні з результатами при дискретності 1,7 мс, у два рази менше, а після дії імпульсних впливів на блок озброєння при дискретності 1,0 мс вертається у вихідне положення з похибкою, яка не перевищує 0,1 кут. хв. Встановлено, що частота формування вихідних сигналів ДУС має бути не менш 1000 Гц і смуга пропускання – не менш 100 Гц.

Висновки

Проведений порівняльний аналіз, із застосуванням методів математичного моделювання, підтвердив доцільність застосування в якості сенсорів кутової швидкості твердотільних гіротахometrів, за рахунок більш високої смуги пропускання та підвищеної частоти інформаційного обміну, що, в свою чергу, призведе до зменшення похибок та покращення характеристик приладових стабілізаторів.

Література

1. Лепешинский И.Ю. Автоматические системы управления вооружением [Электронный ресурс] : учебное пособие. Лепешинский И.Ю., Варлаков П.М., Захаров Д.Н., Чикирев О.И. – Омск, 2010. – С. 200. – Режим доступа : mslstarussia.ru/forum/dowland/life.php?id=36773.
2. Безвесільна О.М. Системи наведення та стабілізації озброєння : монографія / Безвесільна О.М., Цірук В.Г., Квасников В.П., Чіковані В.В. – Київ : ЖДТУ, 2014. – 176 с.
3. Гиротахometrи ГТ46-01 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://zelaz.ru/girotahometr-gt46-gt46-01.html>.
4. КВГ, ЦКВГ [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://zelaz.ru/koriolisovyuy-vibracionnyy-girooskop-kvg-ckvg.htm>.
5. Волоконные датчики вращения ВГ***. Сводные ТУ [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://www.fizoptika.ru/docs/fizoptika_doc105.pdf.
6. Сущенко О.А. Озор современного состояния микроэлектромеханических датчиков угловой скорости и тенденции их развития / О.А. Сущенко, С.В. Карасев // Електроніка та системи управління. – 2011. – № 1(27). – С.103–108.
7. G20 to axis MEMS rate gyro [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.gladiatorotechnologies.com>.
8. Математична модель та технічні характеристики гіротахometrа ГТ-46 / О.М. Безвесільна, В.Г. Цірук, Д.С. Козюков // Всеукраїнська науково-практична on-line конференція “Технічні науки на сучасному етапі” (присвячена Дню науки), 19.05.2018. – С. 92–93.

References

1. Lepeshinskij I.Yu. Avtomaticheskie sistemy upravleniya vooruzheniem [Elektronnyj resurs] : uchebnoe posobie. Lepeshinskij I.Yu., Varlakov P.M., Zaharov D.N., Chikirev O.I. – Omsk, 2010. – S. 200. – Rezhim dostupa : mslstarussia.ru/forum/dowland/life.php?id=36773.
2. Bezvesilna O.M. Systemy navedennia ta stabilizatsii ozbroiennia : monohrafyia / Bezvesilna O.M., Tsiruk V.H., Kvasnykov V.P., Chikovani V.V. – Kyiv : ZhDTU, 2014. – 176 s.
3. Hyrotakhometry HT46-01 [Elektronnyj resurs]. – Rezhym dostupa : <https://zelaz.ru/girotahometr-gt46-gt46-01.html>.
4. KVH, TsKVH [Elektronnyj resurs]. – Rezhym dostupa : <https://zelaz.ru/koriolisovyuy-vibracionnyy-girooskop-kvg-ckvg.htm>.
5. Volokonnye datchyky vrashcheniya VH***. Svodnye TU [Elektronnyj resurs]. – Rezhym dostupa : https://www.fizoptika.ru/docs/fizoptika_doc105.pdf.
6. Sushenko O.A. Ozor sovremennogo sostoyaniya mikroelektromehanicheskih datchikov uglovoj skorosti i tendencii ih razvitiya / O.A. Sushenko, S.V. Karasev // Elektronika ta sistemi upravlinnya. – 2011. – № 1(27). – S.103–108.
7. G20 to axis MEMS rate gyro [Elektronnyj resurs]. – Rezhym dostupa : <http://www.gladiatorotechnologies.com>.
8. Matematychna model ta tekhnichni kharakterystyky hirotakhometrа HT-46 / O.M. Bezvesilna, V.H. Tsiruk, D.S. Koziukov // Vseukrainska naukovopraktychna on-line konferentsiia “Tekhnichni nauky na suchasnomu etapi” (prysviachena Dniu nauky), 19.05.2018. – S. 92–93.

Рецензія/Peer review : 27.5.2019 р.

Надрукована/Printed : 2.6.2019 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Ю. В. Киричук

В.Ю. ТИТОВА, С.О. САВЧУК, В.Ю. ЧЕРНИШ
Хмельницький національний університет

КОНЦЕПТУАЛЬНА МОДЕЛЬ СИСТЕМИ ЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЇ В СУЧАСНИХ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМАХ

В даній статті проведено деталізацію задач, які виникають під час захисту інформації у комп'ютерних системах від дії шкідливого програмного забезпечення. Після деталізації задачі розмежовано між підсистемами системи захисту інформації, що дозволило спроектувати структуру зазначеної системи. Запропонована авторами структура за рахунок введення у неї інтелектуальних компонентів дозволяє підвищити ефективність захисту інформації в сучасних комп'ютерах.

Ключові слова: концептуальна модель, структурна схема, захист інформації, комп'ютерні системи.

VERA YURIIVNA TITOVA, SERHII OLEHOVYCH SAVCHUK, VLADYSLAV YURIOVYCH CHERNYSH
Khmelnytskyi National University

CONCEPTUAL MODEL OF THE SYSTEM OF INFORMATION PROTECTION IN MODERN COMPUTER SYSTEMS

The details of tasks that arise during the protection of information in computer systems from the action of malicious software are analysed in this article. Detailing tasks are delimited between the subsystems of the information protection system, which allowed designing the structure of this system. The system of computer information protection consists of the following components: the dialog subsystem, the monitoring subsystem, the planning of inspections subsystem, the update subsystem. The proposed structure doesn't contradict to the "Concept of information security protection in computer systems" adopted to date and takes into account the measures taken to automate the protection of information in modern computer systems. It also can improve the effectiveness of information security in modern computers by introducing its intellectual components.

Keywords: conceptual model, structure diagram, information protection, computer systems.

Вступ

В сучасному суспільстві комп'ютерні системи активно впроваджуються у фінансові, юридичні, промислові, торгові та соціальні галузі. У зв'язку з цим швидко зростає інтерес до проблем збереження та захисту інформації.

Тривалий час методи захисту інформації розроблялися тільки державними органами, а їхнє впровадження розглядалося як виняткове право певної держави [1–3]. Проте в останні роки збільшилися спроби несанкціонованого доступу до конфіденційної інформації, а проблеми захисту інформації виявилися в центрі уваги багатьох вчених і спеціалістів різних країн.

Згідно з оглядами міжнародних агентств з інформаційної безпеки, можна констатувати таке [3]:

- метою створення шкідливих програм і проведення атак стає, крім отримання грошового прибутку, крадіжка і подальше використання будь-якої можливої інформації
- з'являється новий клас шкідливих програм, націлений як на крадіжку персональної інформації користувачів, так і на тотальну крадіжку всіх інших даних.

А тому однією з актуальних на сьогоднішній день задач є вирішення питань ефективного захисту інформації, як від зовнішніх, так і від внутрішніх загроз, за рахунок створення та впровадження систем захисту інформації в автоматизованих системах підприємств, установ та організацій [3].

Характеристика предметної області

На сьогоднішній день існує багато методів та принципів захисту інформації у комп'ютерних системах, серед яких можна виділити групу методів виявлення ШПЗ. Методи даної групи умовно можна розділити на [4–6]:

- сигнатурні або точні методи виявлення шкідливого програмного забезпечення (ШПЗ), засновані на порівнянні вмісту підозрілих програм та файлів з відомими зразками шкідливих програм;
- евристичні або наближені методи, які дозволяють з певною імовірністю припустити, що деяка програма або файл являють собою ШПЗ.

Сигнатурний аналіз полягає у виявленні характерних ідентифікуючих рис кожного ШПЗ і пошуку його шляхом порівняння файлів з виявленими рисами. Сигнатурою ШПЗ вважається сукупність рис, що дозволяють однозначно ідентифікувати наявність його присутність у файлі (включаючи випадки, коли файл цілком є такою програмою). Всі разом сигнатури відомих шкідливих програм складають базу даних ШПЗ. Завдання виділення сигнатур, як правило, вирішують люди-експерти в області захисту комп'ютерної інформації або спеціальні автоматизовані засоби виділення сигнатур [4, 6].

Якщо сигнатурний метод заснований на виділенні характерних ознак ШПЗ і пошуку цих ознак у файлах, то евристичний аналіз ґрунтується на припущенні, що нові шкідливі програми часто виявляються схожі на будь-які з уже відомих та намагаються нанести шкоду комп'ютерній системі. А тому, крім пошуку у файлах вже знайомих сигнатур, даний метод заснований на виділенні основних шкідливих дій, таких як, наприклад: видалення файлу, запис у файл, запис в певні області системного реєстру, відкриття порту на прослуховування, перехоплення даних що вводяться з клавіатури, розсилка листів та ін. [4, 6].

Позитивним ефектом від використання цього методу є можливість виявити нове ШПЗ ще до того, як для нього будуть виділені сигнатури. Негативним – імовірність помилково визначити наявність у файлі шкідливу програму, коли насправді файл її не містить.

Практично, на сьогоднішній день, будь-яка система для захисту комп'ютерної інформації використовує обидва методи виявлення ШПЗ [4–6]. Проте аналіз ефективності таких програм дозволяє зробити висновок, що зазначених методів для успішної роботи недостатньо. Більш того, одне тільки їх використання, зокрема через можливість помилкового спрацьовування, може призвести до великих втрат інформації, а це є неприпустимим.

Постановка задачі

Отже, можна зробити висновок, що для збільшення ефективності захисту комп'ютерної інформації, зазначені системи мають базуватися не тільки на методах виявлення ШПЗ, але й містити допоміжні модулі, які будуть виконувати додаткові задачі.

Концептуальна модель системи захисту комп'ютерної інформації

Серед множини задач, які виникають під час захисту комп'ютерної інформації та виявлення ШПЗ, можна виділити наступні [4–6]:

- задача своєчасного оновлення сигнатурних баз даних;
- задача захисту від можливої втрати інформації у результаті помилкового спрацьовування;
- задача моніторингу присутності ШПЗ в режимі реального часу або згідно з розкладом перевірок.

Оновлення сигнатурних баз може проводитись двома шляхами. Перший – це завантаження з Інтернет-баз останніх версій відомих сигнатур ШПЗ. Другий – це виявлення підозрілих програм та файлів на основі аналізу їх поведінки та внесення їх сигнатур до бази даних після того, як їх шкідлива дія буде підтверджена користувачем.

Захист від помилкового спрацьовування полягає у використанні спеціальних технологій, які дозволяють ізолювати та зберегти підозрілу програму або файл з можливістю їх відновлення користувачем у разі потреби. У більшості сучасних систем захисту інформації такі технології носять назву «карантин».

Задача моніторингу присутності ШПЗ полягає у періодичній перевірці комп'ютерної системи на наявність зазначених шкідливих програм. Дана перевірка може проходити безперервно, в режимі «онлайн», що забезпечує більш ефективний захист, проте потребує більших ресурсних затрат комп'ютерної системи, що може сказатися на її продуктивності в цілому. Або дана перевірка може проводитися за розкладом, який задається користувачем. Це дозволяє знизити використання ресурсів комп'ютерної системи, проте підвищує ризик втрати інформації, оскільки ШПЗ може проникнути у систему між перевірками та встигнути нанести їй шкоду.

Альтернативою цим двом методам є «інтелектуальний моніторинг», який полягає в аналізі діяльності користувача та зміни розкладу перевірок в залежності від неї. Наприклад, якщо користувач активно працює в мережі Інтернет й імовірність проникнення у комп'ютер ШПЗ зростає, система переходить в режим онлайн-моніторингу. А у випадку виконання комп'ютером роботи, непов'язаної з надходженням нових потоків даних, здійснює перевірку щодня або щотижня.

Отже, на основі задач, які має виконувати система захисту інформації було побудовано її концептуальну модель (рис. 1). У овалах зазначені задачі, що покладені на систему. Стрілки вказують напрямки надання інформації та її зміст.

З аналізу наведеної концептуальної моделі можна зробити висновок, що система захисту комп'ютерної інформації має складатися з наступних підсистем: діалогової, моніторингу ШПЗ, планування перевірок, оновлення.

Структура зазначеної системи наведена на рис. 2.

Діалогова підсистема являє собою інтерфейс користувача для зручності спілкування із системою. За її допомогою здійснюється виконання таких функцій, як налаштування параметрів моніторингу ШПЗ, налаштування завантаження оновлень, підтвердження або відхилення додавання до бази нових сигнатур, налаштування графіку перевірок, підтвердження або відхилення видалення підозрілих програм та файлів, які знаходяться у карантині. Крім того, за допомогою цієї підсистеми здійснюється захист налаштувань від зміни їх ШПЗ та забезпечується можливість віддаленого доступу до системи захисту комп'ютерної інформації.

Підсистема оновлення здійснює наповнення бази даних сигнатур відомими сигнатурами ШПЗ з мережі Інтернет та за рахунок пошуку сигнатур підозрілих програм та файлів, шкідлива дія яких підтверджується. Для виявлення зазначених програм та файлів використовуються компоненти штучного інтелекту, а саме система нечіткого логічного висновку, що базується на ознаках діяльності підозрілих програм та файлів, виділених системою моніторингу, та визначає імовірність їх відношення до ШПЗ.

Підсистема планування перевірок базується на графіку перевірок, який задається користувачем, та аналізі діяльності користувача, який дозволяє, за потреби, вносити зміни в зазначений графік. Аналіз здійснюється за допомогою вбудованих систем моніторингу діяльності користувача операційних систем сучасних комп'ютерів.

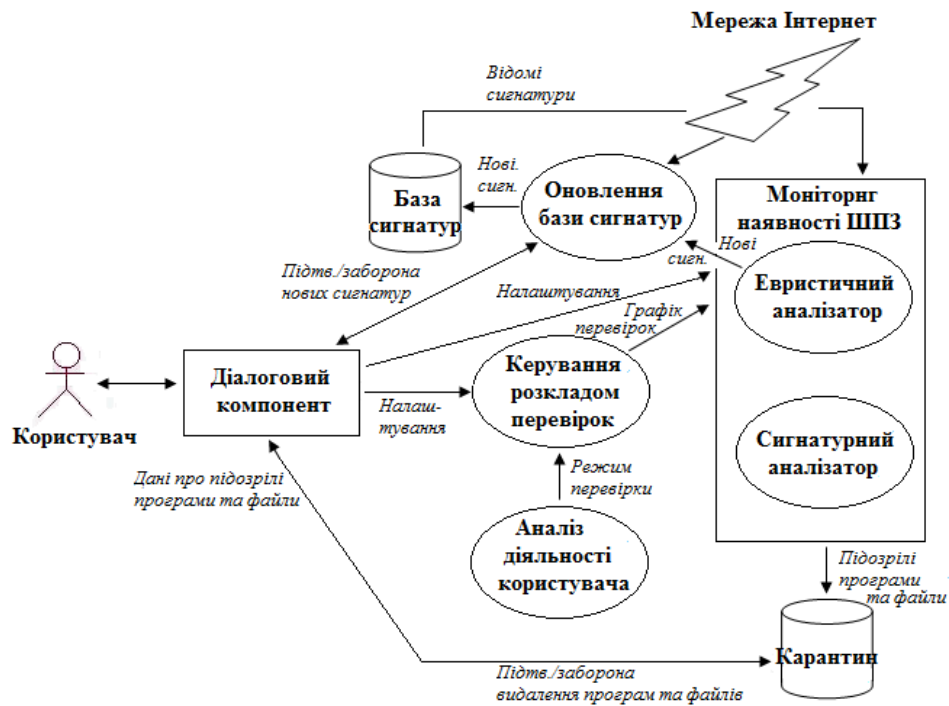


Рис. 1. Концептуальна модель системи захисту комп'ютерної інформації

Підсистема моніторингу ШПЗ базується на відомих на сьогоднішній день методах виявлення шкідливих програм та файлів, а саме сигнатурному та евристичному. Відомі сигнатури ШПЗ необхідні для ефективного моніторингу, надходять з бази сигнатур, яка регулярно оновлюється підсистемою оновлення.

База карантину містить у собі програми та файли, визнані підсистемою моніторингу підозрілими та ізольованими до рішення користувача.

Запропонована система захисту інформації не суперечить прийнятій на сьогоднішній день «Концепції захисту інформації в комп'ютерних системах» [3] та враховує міри, які приймаються з автоматизації захисту інформації в сучасних комп'ютерних системах.



Рис. 2. Структура системи захисту комп'ютерної інформації

Висновки

Підвищення ефективності захисту інформації було досягнуто за рахунок деталізації та розмежування задач, які постають у процесі захисту інформації та виявлення ШПЗ в сучасних комп'ютерних системах, а саме:

- аналізу діяльності користувача та внесення залежно від його результатів коригувань у графік перевірок, заданий користувачем;
- інтелектуального аналізу підозрілих програм та файлів та доповнення за рахунок цього бази даних сигнатур відомого ШПЗ.

Запропоновані на основі проведеної деталізації концептуальна модель та структурна схема є основою для подальшого створення системи захисту комп'ютерної інформації у автоматизованих системах підприємств, установ та організацій.

Література

1. Про державну таємницю [Електрон. ресурс] : закон України // Відомості Верховної Ради (ВВР). – 1994. – № 16, ст. 93. – Режим доступу : <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/3855-12>
2. Про Національну систему конфіденційного зв'язку [Електрон. ресурс] : закон України, зі змінами. – Режим доступу : <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/2919-14>
3. Родичев Ю.А. Нормативная база и стандарты в области информационной безопасности: стандарт третьего поколения / Ю.А. Родичев. – СПб : Питер, 2018. – 254 с. – ISBN: 978-5-4461-0861-9
4. Баранова Е.К. Информационная безопасность и защита информации : учеб. пособие / Е.К. Баранова, А.В. Бабаш. – М. : РИОР: ИНФРА-М, 2017. – 322 с. – ISBN: 978-5-369-01450-9
5. Нестеров С.А. Основы информационной безопасности / С.А. Нестеров. – М. : Изд. «Лань», 2016. – 324 с. – ISBN: 978-5-8114-2290-6
6. Бирюков А.А. Информационная безопасность. Защита и нападение / А.А. Бирюков. – М. : ДМК-Пресс, 2017. – 434 с. – ISBN: 978-5-97060-435-9

References

1. Pro derzhavnu taiemnytsiu [Elektron. resurs] : zakon Ukrainy // Vidomosti Verkhovnoi Rady (VVR). – 1994. – № 16, st. 93. – Rezhym dostupu : <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/3855-12>
2. Pro Natsionalnu systemu konfidentsiinoho zviyazku [Elektron. resurs] : zakon Ukrainy, zi zminamy. – Rezhym dostupu : <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/2919-14>
3. Rodichev Yu.A. Normativnaya baza i standarty v oblasti informacionnoj bezopasnosti: standart tretetogo pokoleniya / Yu.A. Rodichev. – SPb : Piter, 2018. – 254 s. – ISBN: 978-5-4461-0861-9
4. Baranova E.K. Informacionnaya bezopasnost i zashita informacii : ucheb. posobie / E.K. Baranova, A.V. Babash. – M. : RIOR: INFRA-M, 2017. – 322 s. – ISBN: 978-5-369-01450-9
5. Nesterov S.A. Osnovy informacionnoj bezopasnosti / S.A. Nesterov. – M. : Izd. «Lan», 2016. – 324 s. – ISBN: 978-5-8114-2290-6
6. Biryukov A.A. Informacionnaya bezopasnost. Zashita i napadenie / A.A. Biryukov. – M. : DMK-Press, 2017. – 434 s. – ISBN: 978-5-97060-435-9

Рецензія/Peer review : 26.5.2019 р.

Надрукована/Printed : 2.6.2019 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Говорущенко Т.О.

О.В. ІВАНОВ, А.Ю. НЕСТЕРЕНКО, В.В. КАЛЮЖНИЙ
Хмельницький національний університет

АНАЛІЗ МЕТОДІВ АВТОМАТИЗОВАНОГО МОНІТОРИНГУ ПАСИВНИХ ОПТИЧНИХ МЕРЕЖ

Метою цієї статті є аналіз процесу моніторингу пасивних оптичних мереж. Враховуючи актуальність використання пасивних оптичних мереж, показано, що задача збору даних з пасивних оптичних мереж є актуальною і в цьому напрямку працюють фахівці у всьому світі задля забезпечення своєчасного виявлення та попередження несправностей. У статті розглянуто автоматизований моніторинг пасивних оптичних мереж і ранньої діагностики пошкоджень оптичного кабелю.

Ключові слова: пасивна оптична мережа (PON), сплітер, рефлектометр, оптичний кабель (ОК), оптичне волокно (ОВ), волокно-оптичні лінії передачі (ВОЛП), автоматизована система моніторингу.

O.V. IVANOV, A.Y. NESTERENKO, V.V. KALIUZHNYI
Khmelnitskyi National University

ANALYSIS OF METHODS OF AUTOMATED MONITORING OF PASSIVE OPTICAL NETWORKS

The purpose of this article is, basically, analysis of the process of monitoring of passive optical networks, consideration of the features of the information gathering process from passive optical networks. Given the active use of passive optical networks in the means of information transmission, there is a problem of control of passive optical networks, ensuring their uninterrupted operation, monitoring the state of the network and instantaneous response in the event of a failure in the passive optical network, and therefore this task is very relevant today. Accordingly, there is a need for research in methods and means of collecting information from passive optical networks in order to ensure effective monitoring of networks, which in turn will lead to faster troubleshooting or warning and network continuity, which is a very important task for all network participants, first of all for end users of the network. The method of automated monitoring of passive optical networks, the main task of which is to provide remote control of passive optical networks, timely detection of failures, to determine the exact location of the malfunction and timely notification, is analysed. The collection of information can be done either on a free network, which at the time of the collection of information does not transmit any data, and the network in which the traffic is transmitted. In the second case, other frequencies are used to collect information in order not to interfere with the flow of data users on the network. The presented system includes a remote testing module, a test access module, a monitoring system monitoring device based on a personal computer. The network monitoring system uses the principle of operation of the reflectometer, sending signals to the network at the required frequency, and receiving them back - calculations are carried out.

Keywords: Passive Optical Network (PON), splitter, reflectometer, optical cable (OC), optical fiber (OF), fiber optic transmission lines (AVLP), automated monitoring system.

Вступ

Розвиток мережі Internet, в тому числі поява нових послуг зв'язку, сприяє зростанню переданих мережею потоків даних і змушує операторів шукати шляхи збільшення пропускної спроможності транспортних мереж.

Розподільна мережа доступу PON, заснована на деревовидній волоконній кабельній архітектурі з пасивними оптичними сплітерами на вузлах, можливо, є найбільш економічною і здатна забезпечити широкопasmову передачу різноманітних додатків. Головна ідея PON — забезпечити високу пропускну здатність для ліній передач інформації. Для безперебійної роботи PON необхідно проводити моніторинг стану оптичних пасивних мереж.

З врахуванням вище сказаного, аналіз методу моніторингу пасивних оптичних мереж є актуальним науково-технічним завданням, вирішенню якого присвячена дана магістерська робота.

Постановка задачі

Існуючі, на даний момент, методи моніторингу пасивних оптичних мереж, вимагають аналізу та подальшого розвитку в аспектах, що стосуються автоматизації процесу збору інформації щодо стану мережі.

У результаті проведеного огляду доведено актуальність завдання моніторингу PON, яке потребує розбудови семантичних моделей, а також інформаційно-пошукових алгоритмів.

Для подальшої роботи була сформульована мета розробки автоматизованого моніторингу пасивних оптичних мереж.

Основна частина

Незалежно від методу контролю оптичних волокон (ОВ) системи моніторингу повинні забезпечувати дистанційний контроль пасивних і активних оптичних кабелів (ОК), точне і своєчасне документування, автоматичне виявлення несправностей з вказанням їх точного місця знаходження, контроль і керування процесом сповіщення про пошкоджені ОК.

Найбільш ефективно перераховані задачі можуть бути розв'язані за допомогою систем автоматичного моніторингу волоконно-оптичних ліній передачі (ВОЛП), включаючи систему віддаленого контролю ОВ, програму прив'язки топологій мережі до електронної географічної карти місцевості, а також бази даних оптичних компонентів, критеріїв і результатів контролю. Дистанційний контроль ОВ здійснюється оптичним імпульсним рефлектометром (OIP), діагностуючим стан ОК по зворотному розсіюванню світлової хвилі при введенні в ОВ зондуючих імпульсів. При цьому системи можуть проводити

моніторинг як вільних, так і зайятих ОВ.

В першому випадку виконується моніторинг вільних резервних ОВ, стану яких відповідає справність всього ОК.

В другому випадку проводиться моніторинг ОВ, через який передається трафік систем передачі. Для реалізації даного методу тестування використовується робоча довжина хвилі рефлектометра, відмінна від робочої довжини хвилі систем передачі, а в схему мережі моніторингу вводиться ряд пасивних оптичних компонентів для мультиплексування і розподілу інформаційних сигналів рефлектометра.

Для забезпечення довголітньої роботи необхідні відповідні умови, і головна з них – відсутність механічної напруги у волокні. Підвищений натяг волокна в кабелі викликає деградацію його цілісних характеристик, що врешті-решт призводить до обриву волокна. Навіть незначний натяг волокна може призвести до багатократного скорочення строку служби. Звичайні ОІР не в стані визначити натяг волокна, оскільки величина оптичних втрат при виникненні натягу в ОВ, як правило, залишається в межах норми аж до моменту виникнення незворотних змін у волокні. Для розв'язання цієї задачі були розроблені брілюєновські рефлектометри, які не тільки вимірюють оптичні властивості, а й на їх основі дозволяють прогнозувати обрив волокна.

Автоматизовані системи моніторингу, як правило складаються з системи віддаленого контролю ОВ (Remote Fiber Test System – RFTS – ядро системи), програми прив'язки топології мережі до географічної карти місцевості, бази даних оптичних компонентів, критеріїв і результатів контролю.

Основу архітектури системи RFST в загальному випадку складають наступні функціональні елементи:

1. Віддалений модуль тестування ОВ (Remote Test Unit – RTU)
2. Модуль доступу для тестування ОВ (Optical Test Access Unit – OTAU)
3. Пристрій керування системою моніторингу на базі персонального комп'ютера (Test System Control – TCS)
4. В системах RFTS виділяють наступні функціональні елементи (рис. 1):
5. Апаратна частина (центральный блок керування TCS, станції контролю мережі (Optical Network Terminal – ONT), блоки дистанційного тестування волокон RTU, OTAU і т.д.);
6. Системи керування;
7. Геоінформаційна система прив'язки топологій мережі до карти місцевості;
8. Бази даних ОК, обладнання мережі, критеріїв і результатів тестування ОК ВОЛП.

В склад віддаленого модуля тестування входять один чи два оптичних модуля рефлектометра, набір інтерфейсних плат для забезпечення зв'язку між компонентами системи, плата комп'ютера для зберігання і обробки даних в процесі моніторингу.

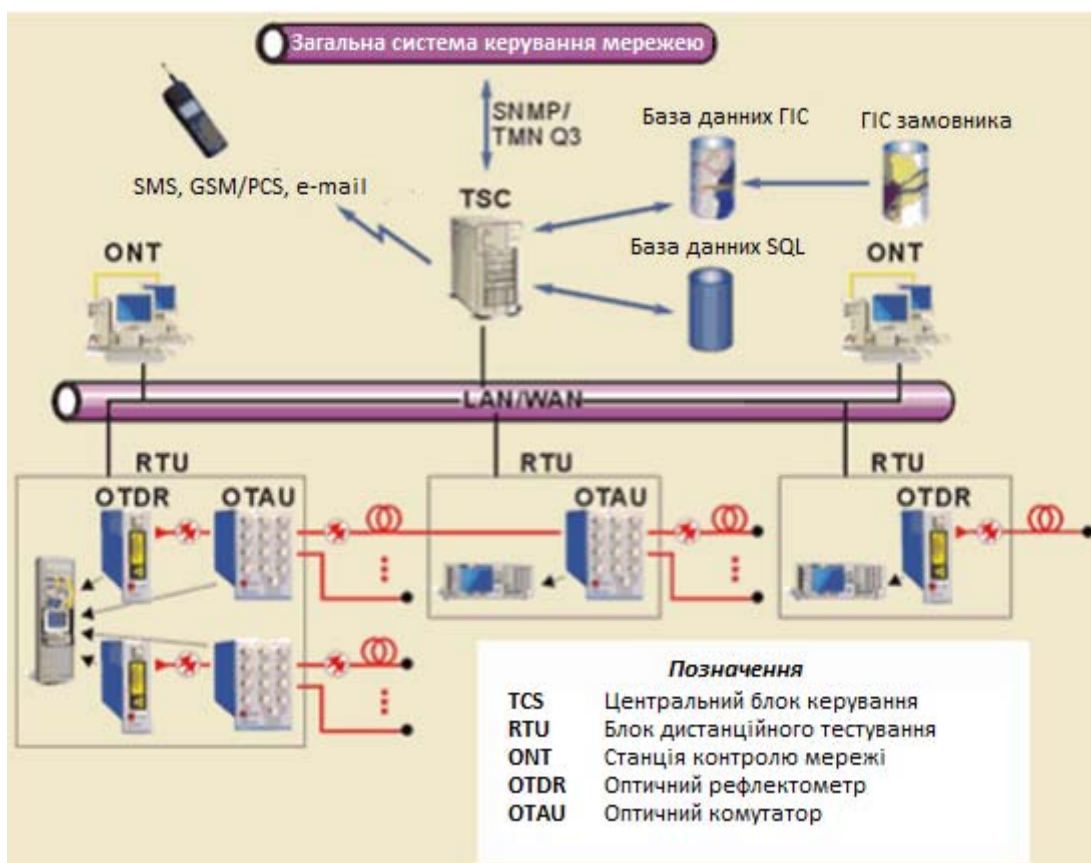


Рис. 1. Архітектура системи RFST

ОІР оперативно надає наглядну інформацію, що дозволяє судити про якість ВОЛП, дає можливість виявити і локалізувати підозрілі ділянки. Враховуючи можливі джерела помилок і прийнявши заходи з їх усунення, за допомогою ОІР можна проводити вимірювання втрат на з'єднувачах і на інших ділянках ВОЛП.

Оптичний рефлектометр періодично знімає дані по загасанню з підключених до нього оптичних волокон мережі. Кожна отримана рефлектограма порівнюється з еталонною, що відбиває зазвичай початковий стан волокна. Якщо відхилення від норми перевищує певні, заздалегідь встановлені пороги (попереджувальний або аварійний), то відповідний блок RTU автоматично посилає на центральний сервер системи попередження або повідомлення про несправності. Усі рефлекторами також надходять на центральний сервер, який зберігає їх в базі даних для подальшої обробки. Центральний сервер системи забезпечує доступ до всіх результатів тестування волокон для будь-якої станції контролю мережі і автоматично розсилає повідомлення про несправності в залежності від рівня серйозності події на заздалегідь задані IP- або електронні адреси, пейджери і телефони, вузли обслуговування ВОЛП. Формула потужності світлової хвилі на вході ОІР має вигляд :

$$P(t) = 0,5P_0\Delta t S\alpha v_g \exp(-\alpha v_g t), \quad (1)$$

а якщо виразити через відстань, то

$$P(x) = 0,5P_0\Delta t S\alpha v_g \exp(-2\alpha x), \quad (2)$$

де P_0 і Δt – відповідно, значення потужності і тривалості імпульсу випромінювання на вході ОВ; S = параметр розсіювання ОВ; α – коефіцієнт затухання ОВ; v_g - групова швидкість розповсюдження випромінювання по ОВ.

З формул (1) і (2) слідує, що потужність зворотно розсіяної світлової хвилі прямо пропорційне потужності P_0 на вході ОВ, тривалості Δt імпульса потічного випромінювання і параметрам S і α ОВ, а також залежить від функції, пропорційній затуханню і груповій швидкості v_g .

Якщо коефіцієнт затухання і коефіцієнт зворотно розсіювання залишаються постійними по всій довжині ОВ, то $P(x)$ спадає від початку ОВ експоненціально. Через стрибки показника повідомлень (ПП), в початку і в кінці ОВ відносно невелика частина світлової потужності в цих місцях розсіюється назад, що зумовлює присутність піків в початку та кінці рефлектограми.

По часовому інтервалу Δt між двома піками, а також провалинами, відповідним зосередженням втратам, можна розрахувати довжину хвилі ОВ, і координати вказаних вище неоднорідностей:

$$L = \frac{\Delta t c_0}{2 n_g}, \quad (3)$$

де c_0 – швидкість світла в вакуумі, n_g – груповий ПП в серцевині ОВ.

Крім виявлення нерегулярностей, ОІР дозволяє оцінювати втрати в з'єднаннях і на ділянках ВОЛП (рис. 1).

Коефіцієнт втрат ВОЛП розраховуються за формулою (4)

$$a[\text{дБ}] = 5 \cdot 1g(P_2 / P_1), \quad (4)$$

де P_1 і P_2 – рівні оптичної потужності на рефлектограмі, відповідні початку і кінцю зондуєчій ВОЛП.

Внаслідок того, що світло проходить вперед і назад, тут використовується коефіцієнт 5, замість коефіцієнта 10, використовуваного в аналогічному рівнянні для метода світлопропускання.

Подальшим вдосконаленням методики виміру являється калібровка вертикальної шкали пристрою безпосередньо в одиницях вимірюваних втрат. При цьому втрати α_{1-2} для будь-якої ділянки між точками L_1 і L_2 , визначаються за формулою:

$$\alpha_{1-2}[\text{дБ}] = \alpha(L_2) - \alpha(L_1), \quad (5)$$

де $\alpha(L_1)$ і $\alpha(L_2)$ – втрати ВОЛП від початку координат L_2 і L_1 відповідно.

В цілях зменшення впливу власних шумів ОІР на похибку вимірювань використовується математичний апарат регресивного аналізу – апроксимація фрагментів рефлектограми лінійної регресивної залежності методом найменших квадратів (рис. 2)

$$y = \alpha + bx \quad (6)$$

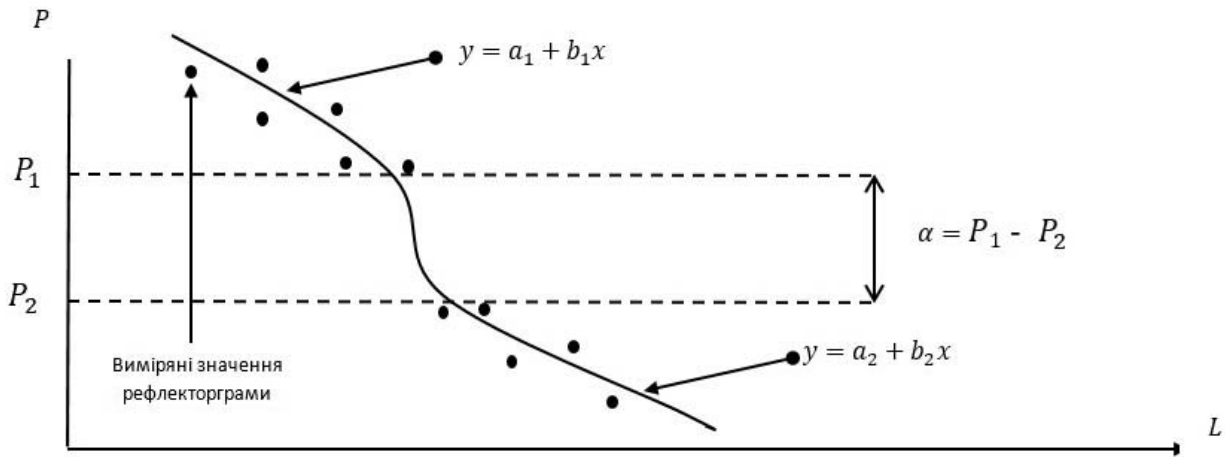


Рис. 2. Апроксимація рефлектограми за методом найменших квадратів

Параметри апроксимації $\alpha i b$ визначаються за формулами:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i' \sum_{i=1}^n (X_i')^2 - \sum_{i=1}^n X_i' \sum_{i=1}^n X_i' Y_i'}{n \sum_{i=1}^n (X_i')^2 - (\sum_{i=1}^n X_i')^2}, \quad (7)$$

$$b = \frac{n \sum_{i=1}^n X_i' Y_i' - \sum_{i=1}^n X_i' \sum_{i=1}^n Y_i'}{n \sum_{i=1}^n (X_i')^2 - (\sum_{i=1}^n X_i')^2}, \quad (8)$$

де X_i – оцінка математичних очікувань вимірюваних координат L_i ; Y_i – оцінка математичних очікувань вимірюваних значень втрат в координатах L_i ; n – кількість відліків на ділянці апроксимації.

Застосування регресії лінійного рівня забезпечує достатню точність апроксимації, так як відповідає поведінці згасання світла в ОВ.

Для автоматичного заміру затухання з'єднання ОВ в ОІР найбільше застосування знайшов спосіб п'яти точок, реалізований в рефлектометрах країн СНГ. Згідно з цим способом, оператор в режимі «Вимірювання затухання на стиках ОВ» розташує п'ять маркерів (рис. 3): два (1 і 2) – на монотонно спадаючій ділянці характеристики однієї довжини, два маркери (4 і 5) – на монотонно спадаючій ділянці другої довжини і один маркер (3) – в місці стику.

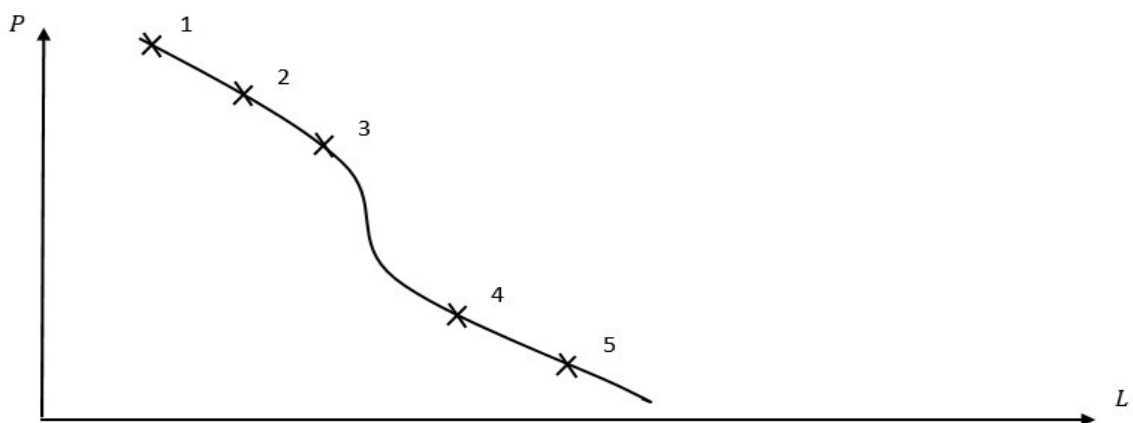


Рис. 3. Розміщення п'яти маркерів при замірі затухання на стиках ОВ

Маркери 1, 2 і 4, 5 не повинні попасти на провали характеристики. В режимі лінійної апроксимації по звіту рефлектограми між межами 1–2 і 4–5 вираховуються параметри $\alpha i b$ лінійної регресії. Відстань по осі координат між цими прямими в точці установки маркера 3 пропорційна шуканому значенню затухання в місці стику.

Висновок

Враховуючи той факт, що пасивні оптичні мережі, наразі, активно розвиваються і набувають все більш широкого використання, є актуальною розробка системи моніторингу і ранньої діагностики

пошкоджені ОК зв'язку, що дозволить обслуговуючому персоналу в масштабі реального часу (практично миттєво) визнавати, де стався збій і який рівень втрат у волокні ОК ВОЛП. Це в десятки разів скорочує час пошуку несправностей і спрощує проведення профілактичного обслуговування ВОЛП. Враховуючи розміри сучасних цифрових волоконно-оптичних мереж, важливість і об'єми передаваної ними інформації, економічну ефективність застосування системи моніторингу важко переоцінити.

Література

1. Некрасов С. Е. Системи дистанційного моніторингу ОК / С. Е. Некрасов // Технологии и средства связи. – 2006. – № 5. – С. 28–32.
2. Богачков И. В. Импульсно-рефлектометрические методы измерения параметров волоконно-оптических линий передачи : монография / И. В. Богачков, Горлов Н. И. ; Омский гос. техн. ун-т, Сибирский гос. ун-т телекоммуникаций и информатики. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2007. – 136 с. – ISBN 5-8149-0515-8.
3. Богачков И. В. Измерение характеристик волоконно-оптических линий связи с помощью импульсно-рефлектометрических методов : монография / И. В. Богачков, Н. И. Горлов ; Омский гос. техн. ун-т, Сибирский гос. ун-т телекоммуникаций и информатики. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2008. – 188 с. – ISBN 978-5-8149-0623-6.
4. Богачков И. В. Новые задачи технической эксплуатации разветвленных волоконно-оптических сетей / И. В. Богачков, В. А. Масйтренко, Н. И. Горлов ; Омский гос. техн. ун-т, Сибирский гос. ун-т телекоммуникаций и информатики // Тр. IX Междунар. науч.-техн. конф. «Проблемы техники и технологий телекоммуникаций» ПТТТ-2008. – Казань : Изд-во КГТУ, 2008. – С. 282–283. – ISBN 978-5-7579-1196-0.
5. Горлов Н. И. Методы и средства измерений параметров волоконно-оптических линий передачи : монография / Н. И. Горлов, И. В. Богачков ; Омский гос. техн. ун-т, Сибирский гос. ун-т телекоммуникаций и информатики. – М. : Радиотехника, 2009.
6. Гроднев И. И. Волоконно-оптические линии связи / Гроднев И. И. – М. : Радио и связь, 2007. – 224 с.
7. Алексеев Е. Б. Оптические сети доступа / Алексеев Е. Б. – М. : ИПК при МТУ СИ, 2007. – 140 с.
8. Крухмалев В. В. Основы проектирования и технической эксплуатации цифровых волоконно-оптических систем передачи / В. В. Крухмалев, В. Н. Гордиенко, А. Д. Моченов. 2009. – 510 с.

References

1. Nekrasov S. E. Sistemi distancionnogo monitoringa OK / S. E. Nekrasov // Tehnologii i sredstva svyazi. - 2006. - № 5. - S. 28-32.
2. Bogachkov I. V. Impulsno-reflektometricheskie metody izmereniya parametrov polokonno-opticheskikh linij peredachi : monografiya / I. V. Bogachkov, Gorlov N. I. ; Omskij gos. tehn. un-t, Sibirskij gos. un-t telekommunikacij i informatiki. - Omsk : Izd-vo OmGTU, 2007. - 136 s. - ISBN 5-8149-0515-8.
3. Bogachkov I. V. Izmerenie harakteristik volokonno-opticheskikh linij svyazi s pomoshyu impulsno-reflektometricheskikh metodov : monografiya / I. V. Bogachkov, N. I. Gorlov ; Omskij gos. tehn. un-t, Sibirskij gos. un-t telekommunikacij i informatiki. - Omsk : Izd-vo OmGTU, 2008. - 188 s. - ISBN 978-5-8149-0623-6.
4. Bogachkov I. V. Novye zadachi tehnicheckoj ekspluatcii razvetvlennykh volokonno-opticheskikh setej / I. V. Bogachkov, V. A. Masjtrenko, N. I. Gorlov ; Omskij gos. tehn. un-t, Sibirskij gos. un-t telekommunikacij i informatiki // Tr. IX Mezhdunarod. nauch.-tehn. konf. «Problemy tehniki i tehnologij telekommunikacij» PTiTT-2008. - Kazan : Izd-vo KGTU, 2008. - S. 282-283. - ISBN 978-5-7579-1196-0.
5. Gorlov N. I. Metody i sredstva izmerenij parametrov volokonno-opticheskikh linij peredachi : monologiya / N. I. Gorlov, I. V. Bogachkov ; Omskij gos. tehn. un-t, Sibirskij gos. un-t telekommunikacij i informatiki. - M. : Radiotehnika, 2009.
6. Grodnev I. I. Volokonno-opticheskie linii svyazi / Grodnev I. I. - M. : Radio i svyaz, 2007. - 224 s.
7. Alekseev E. B. Opticheskie seti dostupa / Alekseev E. B. - M. : IPK pri MTU SI, 2007. - 140 s.
8. Kruhmaliev V. V. Osnovy proektirovaniya i tehnicheckoj ekspluatcii cifrovyyh volokonno-opticheskikh sistem peredachi / V. V. Kruhmaliev, V. N. Gordienko, A. D. Mochenov. 2009. - 510 s.

Рецензія/Peer review : 6.5.2019 р. Надрукована/Printed : 2.6.2019 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Говорущенко Т.О.

МЕТОД ТА ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИЯВЛЕННЯ ШКІДЛИВИХ ЗАПИТІВ В КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖАХ НА ОСНОВІ ПРОТОКОЛУ DNS

В роботі представлено метод, спрямований на виявлення і блокування доменів, які запитуються в потоковому трафіку DNS і використовуються для зловмисного видалення даних DNS. Згідно з методом поточковий трафік DNS збирається і перетворюється на вектори відповідності доменів. Після цього попередньо навчений класифікатор класу використовується для виявлення доменів, які обмінюються даними через DNS. Одразу після цього запити на домен, які класифікуються як такі, що використовуються для обміну даними, блокуються на невизначений час. Метод дозволяє його реалізацію в DNS-серверах, якщо вони підтримують протоколювання DNS-трафіку і чорного списку доменів. Описаний метод дає можливість виявляти шкідливі потоки пакетів даних серед звичайних, а постійний моніторинг визначених шкідливих потоків дає можливість виявити зловмисника та дозволяє ізолювати звичайний мережевий потік даних від шкідливого.

Ключові слова: DNS протокол, DoS-атака, кіберзагроза, кібератака, виявлення кібератак, мережний трафік.

S. LYSENKO, V. LISOVYI
Khmelnitskyi National University

METHOD AND SOFTWARE FOR MALICIOUS QUERIES DETECTION IN THE NETWORKS BASED ON THE DNS PROTOCOL

Today's network attacks are one of the most dangerous cyber threats, as well as one of the main sources of illegal earnings on the Internet. Most often, such attacks are carried out by botnets and used for DDoS attacks (distributed attacks such as "denial of service"), collecting confidential information, sending spam, using adware, phishing, clicking clicks (click traffic), creating spam searches, the use of infected computers for storing illegal material (pirated software, etc.) and as proxies for anonymizing access to the Internet. Antivirus software using signature-based technologies cannot normally detect harmful zero-day software, since such new signatures are not available for newly created malware. An analysis of known methods to combat cyberattacks shows their lack of efficiency, so building a new method for detecting cyber-threats is an extremely urgent task. The article presents a new method for detecting DNS-attack type. Article proposes a method for detecting and blocking domains that are requested in DNS streaming traffic and used to maliciously delete DNS data. According to the method, DNS traffic is collected and converted into domain matching vectors. After that, a pre-trained classifier class is used to identify domains that exchange data through DNS. Immediately thereafter, queries for domains that are classified as used for data exchange are blocked indefinitely. The method allows its implementation on DNS servers if they support DNS traffic logging and the blacklist of domains. The described method makes it possible to detect harmful streams of data packets among ordinary, and continuous monitoring of certain malicious flows makes it possible to detect an attacker and allows to isolate the usual network data stream from the harmful one.

Keywords: DNS protocol, DNS tunnelling, DoS-attack, cyberattack, cyberattacks detection, network traffic.

Вступ

На сьогоднішній день мережні атаки є однією з найбільш небезпечних кіберзагроз [1], а також одним з основних джерел нелегального заробітку в мережі Інтернет. Найчастіше такі атаки здійснюють бот-мережі і використовуються для атак DDoS (розподілені атаки типу «відмова в обслуговуванні»), збору конфіденційної інформації, розсилання спаму, застосування засобів нав'язування реклами, фішингу, накрутки клік-лічильників (клікфрод), створення пошукового спаму, використання інфікованих комп'ютерів для зберігання нелегального матеріалу (піратське ПЗ тощо) та в якості проксі-серверів для анонізації доступу в мережі Інтернет. Щороку по всьому світу бот-мережами інфікується близько 500 млн персональних комп'ютерів, кожну секунду – близько 18 ПК. За останній рік бот-мережі нанесли \$110 млрд збитків світовій економіці [1].

Ряд технологій ухилення від виявлення бот-мереж базуються на використанні системи доменних імен (DNS) – DNS-тунелювання (DNS-tunnelling), «швидкозмінні» мережі (fast-flux service network), технологія «потік доменів» (domain flux) та періодична зміна IP-відображення для шкідливого домена (cycling of IP mapping) [2–5].

На сьогоднішній день існує багато підходів виявлення шкідливого мережного трафіку [6, 7]. В [5] запропоновано систему виявлення шкідливих доменів на основі пасивного DNS-аналізу, що здійснює класифікацію доменних імен за 4 групами ознак, які можуть бути вилучені з DNS-трафіка: (1) часові ознаки; (2) ознаки, що базуються на DNS-відповідях; (3) ознаки, що базуються на значеннях TTL; (4) ознаки, що базуються на доменному імені. В [6] запропоновано підхід, який дозволяє виявляти доменні імена бот-мереж, які використовують метод «швидкозмінних» мереж. Висновок щодо шкідливості доменного імені здійснюється за рядом ознак, отриманих на основі аналізу даних, вилучених з А-, NS-, SOA- та BGP-запитів щодо доменного імені: значення часу життя А-записів (TTL-періоду), IP-адрес в А- та NS-записах, а також значення таймера "retry" (визначає, як довго вторинний сервер імен повинен чекати перед тим, як зробити повторну спробу запиту первинного сервера щодо зміни серійного номера зони, якщо попередня спроба була невдалою). В [7] проведено аналіз можливостей використання DNS-запитів для встановлення прихованих комунікацій. Надано оцінку статистичних методів виявлення аномалій у вмісті DNS-пакетів

шляхом порівняння ймовірнісних розподілів нормального та тунельованого DNS-трафіка. З метою висвітлення потенційної загрози розглянуто можливість здійснення контрзаходів з боку зловмисника. В [8, 9] проведено аналіз великої кількості реальних DNS-запитів та обчислено порогові значення довжини запитаного імені хоста та кількості унікальних символів в ньому, що дозволяють відрізнити легітимний DNS-трафік від тунельованого.

Описані методи мають наступні недоліки: необхідність залучення інформації, отриманої від інших сервісів (WHOIS тощо); необхідність активного DNS-зондування, тому неможливість реалізації на основі пасивного аналізу DNS-трафіка; зосередження на виявленні вузького кола шкідливого ПЗ.

Метод та програмне забезпечення виявлення шкідливих запитів в комп'ютерних мережах на основі протоколу DNS

Запропонований метод являє собою постійно діючий процес, спрямований на виявлення і блокування доменів, які запитуються в потоковому трафіку DNS і використовуються для зловмисного видалення даних DNS. По-перше, поточковий трафік DNS збирається і перетворюється на вектори відповідності доменів. Після цього попередньо навчений класифікатор класу використовується для виявлення доменів, які обмінюються даними через DNS. Відразу після цього запити на домени, які класифікуються як такі, що використовуються для обміну даними, блокуються на невизначений час. Метод дозволяє його реалізацію в DNS-серверах, якщо вони підтримують протоколювання DNS-трафіку і чорного списку доменів (рис. 1).

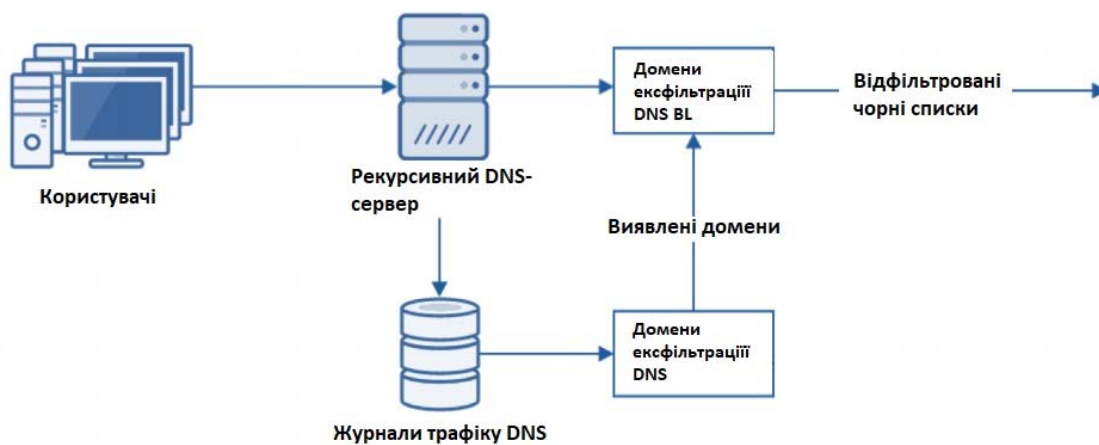


Рис. 1. Архітектура системи виявлення шкідливих запитів

Метод базується на наступних припущеннях:

1) Аномалія обміну даними DNS: на основі загальної схеми для видалення даних (підрозділ II-B) встановлюється аномалія трафіку DNS при використанні для обміну даними. Ми припускаємо, що домени, які використовуються для обміну даними через DNS, ймовірно, будуть характеризуватися більше, ніж середні запити та відповіді, кодовані корисні навантаження (підзапити), а також безліч унікальних запитів.

2) Використання єдиного домену: на основі нещодавно виявленого шкідливого програмного забезпечення ми припускаємо, що для ексфільтрації використовується єдиний домен, що дозволяє виявити його аномалію запитів і заперечення його запитів DNS для припинення витоку. Більш складний випадок з кількох доменів обговорюється в майбутньому розділі роботи.

Запропонований метод має три регульовані параметри (підсумовані в таблиці 1). Налаштування параметрів можуть впливати на швидкість виявлення та їх затримку.

Налаштування v . Вище прийнятна швидкість помилкових спрацьовувань (позначена як v) потенційно збільшить швидкість виявлення за рахунок додаткових помилкових позитивних доменів. Рекомендується встановити значення, яке не перевищує 0,1% (через нестачу загрози), і зменшувати його до того моменту, коли буде досягнуто прийнятну норму помилкових позитивних доменів, яку буде перевірено експертом безпеки.

Таблиця 1

Параметри методу

Ім'я	Опис	Приклад значення
v	Прийнятна швидкість помилкових позитивних доменів	$2 \cdot 10^{-5}$
λ	Частота збору та класифікації даних [хвилини]	15
n_S	Розмір вікна для перевірки (кількість наборів збору даних)	24

У роботі $v = 2 \cdot 10^{-5}$, що дає лише 18 помилкових позитивних доменів у великомасштабному DNS-трафіку з піковою швидкістю 47 мільйонів годинних запитів протягом шести днів. Більше того, оскільки кількість помилкових позитивних доменів зменшувалася в геометричній прогресії з моменту початку

виконання, ми очікуємо, що з огляду на попередні помилкові позитивні результати, цей показник буде значно нижчим. Налаштування λ . Більш низька частота збору даних і класифікації (позначена як λ) дозволяє краще виявляти затримку, наприклад, до λ хвилин з моменту початку ексільтрації. Однак, це вимагатиме, щоб витяг ознак застосовувався на $n_S \cdot \lambda$ хвилин журналів кожних λ хвилин. Тому рекомендується встановити його як низький рівень зберігання, потужності обробки та виділення пам'яті.

Налаштування n_S . Довший розмір вікна інспекції в одиницях λ хвилин (позначений як n_S) дозволяє виявляти «низькі та повільні» атаки, навіть якщо вони відбуваються протягом декількох годин (наприклад, десять номерів кредитних карт вилучаються протягом періоду шести годин). Так само, як і λ , його слід якомога більше збільшувати в межах обмежень зберігання і пам'яті. Більше того, компроміс між негайним блокуванням і виявленням тихої атаки повинен бути відображений у встановленні як n_S , так і λ . Наприклад, захищена бездротова мережа готелю, яка хоче зосередитися на блокуванні безкоштовного доступу Wi-Fi на основі тунелювання DNS, може вибрати $\lambda = 1$, $n_S = 10$, тоді як мережа торговельної точки може використовувати $\lambda = 60$, $n_S = 10$.

Збір даних. Головною метою фази збору даних є генерування компактного представлення доменного трафіку, що сприятиме подальшому ефективному вилученню функцій. Цей етап починається з обробки потокового трафіку DNS кожні λ хвилин і представляє кожен рядок журналу DNS як наступний запис:

$$\langle Q, R, T_j \rangle,$$

таким чином, що Q містить повне ім'я запиту (наприклад, google.com.), R містить повний список значень записів відповіді (наприклад, 8.8.8.8), T містить тип запиту (наприклад, "A"), і j індекс рядка журналу. Зокрема, для випадку неіснуючих відповідей (статус NXDOMAIN), R призначається порожнім рядком. На основі цього подання групуємо DNS-журнали за первинними доменами.

Основне доменне ім'я, таким чином, визначається як конкатенація домену ² другого рівня і домену верхнього рівня ³. Наприклад, для повноцінного доменного імені login.example.org.de. домен другого рівня є example. і домен верхнього рівня є org.de.; отже, основним доменом є example.org.de. Основне використання основного доменного імені призначене для реєстрації домену. Тому, використовуючи його як точку вибірки для завдання класифікації, він призначає клас для кожної реєстрації і є ефективним проти доменів, які були зареєстровані лише для зловмисних дій. Первинний домен може бути вилучений з кожної лінії журналу (як пояснено вище) з використанням функції *prim*, як зазначено нижче:

$$prim(\langle Q, R, T_j \rangle) = P_j,$$

де P_j є основним доменом для j -го рядка журналу. Використовуючи функцію *prim*, лог-лінії можуть бути згруповані за їх первинним доменом, а також за їх дискретними часовими рамками збору t :

$$L_t^{P_i} = \{ \langle Q, R, T_j \rangle \mid prim(\langle Q, R, T_j \rangle) = P_j \}.$$

Таке групування журналів DNS дозволяє ефективно сканувати послідовні журнали, оскільки кожен журнал може бути зібраний один раз, а використаний n_S разів за допомогою розсувного вікна. Наприклад, рядок журналу, який буде зібрано в момент часу t_i , буде споживатися в часи $[t_i, \dots, t_i + n_S)$. Це розсувне вікно протягом останніх n_S λ хвилин виявляється корисним у подальшій фазі вилучення ознак.

Вилучення ознак. Фаза вилучення ознак працює раз на кожні λ хвилин на кожному доменному розсувному вікні, тобто комбінація останніх журналів n :

$$W_{now}^{P_i} = \{ L_t^{P_i} \mid t_{now} - n_S \leq t < t_{now} \}.$$

Визначимо функцію вилучення ознак, *fe*, щоб перетворити вікноспостережень W^{P_i} , на вектор ознак, який представляє конкретний первинний домен у певному вікні спостережень:

$$fe(W_{now}^{P_i}) = \langle P_i, Ent, NI, Uniq, Vol, Len, LMW \rangle,$$

де кожна з наступних ознак є обчислюваною функцією на домені P_i в тимчасовому кадрі t_{now} 1) E відповідає ентропії символу, 2) NI відповідає коефіцієнту типу non-IP, $Uniq$ відповідає унікальному співвідношенню запитів,

3) Vol відповідає обсягу запиту, Len відповідає середній довжині запиту, і LMW відповідає співвідношенню між довжиною найдовшого значущого слова і довжиною субдомену.

Ентропія символів. Поняття ентропії, або щільність інформації, можна інтерпретувати як вимірювання середньої невизначеності букви A , заданої $\{A_1, \dots, A_n - 1\}$ [10]. Ентропія обчислюється над дискретною випадковою величиною X , використовуючи формулу:

$$H(X) = - \sum_{i=0}^n \Pr(x_i) * \log \Pr(x_i),$$

де $\Pr(x_i)$ – ймовірність i -го символу інформації (наприклад, символу) в серії X , що складається з n символів.

Серед інших застосувань ентропія широко використовується як евристика для виявлення шифрування в потоці бітів [11–13]. Обчислення ентропії здійснюється за запитами домену для виявлення зашифрованої або закодованої поведінки запитів. Формально, якщо випадкова величина X є серією символів, а дозволеними символами є літери, цифри і дефіси (LDH), як у запиті на коментарі (RFC) протоколу DNS [27], то:

$$H(X) = - \sum_{xi \in CLHD} Pr(xi) * \log Pr(xi),$$

і функція обчислюється наступним чином:

$$E(W^{Pi}_{mow}) = H(Q_i || \cdot || Q_m),$$

де $Q_i || \cdot || Q_m$ – конкатенація повністю кваліфікованих доменних імен в лог-рядках W^{Pi}_{mow}

Розповсюдження типу RR в IP-вузлі обміну. Згідно з [15] 99,4% запитаних записів ресурсів (RRs) мають наступні типи: A (IPv4), AAAA (IPv6) і PTR (показчики зворотного пошуку).

Однак ці RR обмежені короткою довжиною відповіді (тобто до довжини IP-адреси) порівняно з іншими типами RR (наприклад, TXT, SRV), і, отже, розподіл типів RR може бути різним у використовуваному домені для обміну даними. Створена нами функція обчислює швидкість записів A та AAAA для кожного домену за час:

$$E(W^{Pi}_{mow}) = \frac{\sum_{W^{Pi}_{mow}} |(T = "A" \wedge T = "AAAA")^1|}{\sum_{W^{Pi}_{mow}} 1}.$$

Унікальний коефіцієнт запиту. Домен, піддомени якого використовуються як повідомлення, навряд чи повторить їх. Таким чином, при порівнянні доменів, що використовуються для ексільтрації до звичайних доменів, очікується набагато вищий коефіцієнт унікального запиту. Функція обчислюється так:

$$Uniq(W^{Pi}_{mow}) = \frac{|\{Q | Q \in W^{Pi}_{mow}\}|}{\sum_{W^{Pi}_{mow}} 1}.$$

Унікальний об'єм запитів: у звичайному режимі трафік DNS є досить розрідженим, оскільки відповіді в основному кешуються в межах заглишки. Однак, у разі обміну даними через DNS, трафік, специфічний для домену, повинен уникати кеш-пам'яті за допомогою неповторюваних повідомлень або короткого часу для того, щоб дані перетворилися на сервері зловмисника. Як уникнути кешу, так і тривалого обміну даними, може призвести до більшого обсягу запитів у порівнянні зі звичайними налаштуваннями. Функція обчислюється наступним чином:

$$Vol(W^{Pi}_{mow}) = |\{Q | Q \in W^{Pi}_{mow}\}|.$$

Середня тривалість запиту. Як доповнення до функції обсягу та обмеження розміру запиту, існує компроміс між обсягом запитів та їх довжиною, що робить його ефективною функцією виявлення.

Найдовше змістовне слово над середньою довжиною домену: для кожного основного домену кожен субдомен розкладається на його ієрархічні мітки, упорядковані за їх довжиною. Починаючи від найдовшого до найкоротшого підрядка, пошук слова англійського словника виконується над поточним підрядком. Якщо пошук є успішним (тобто підрядок є дійсним англійським словом), то довжина підрядка вважається довжиною найдовшого значущого слова (LMW). Цю довжину ділять на довжину субдомену та усереднюють за всіма субдоменами. Хоча англійська мова не єдина мова, яка використовується в Інтернеті, це може допомогти розрізнити домени з великою кількістю доменів, які або читаються, або не читаються.

Виявлення обміну даними DNS. Виявлення обміну даними DNS для вхідного вектора ознак обчислюється з використанням моделі виявлення аномалій, а саме ізоляційного лісу [14]. Модель ізоляційного лісу є класичним класифікатором (тобто навчається тільки на існуючих законних даних) і може виявляти аномальну поведінку на майбутніх даних. Тому тут слід обговорити два аспекти: (1) навчання моделі та (2) застосування моделі на нових даних.

Фаза навчання приймає набір раніше зібраних векторів ознак і виводить модель аномалії, яка, по суті, є функцією, яка діє на вибірку і виводить показник аномалії. У нашому випадку вхід до моделі є множиною W_t^{Pi} для кожного домену та для t в певний період часу (наприклад, попередній день), а результат – аномальна оцінка від 0 до 1. Аномалія оцінювання – це функція рівня забруднення, позначена як v , що відноситься до частки шуму в даних. Виходом фази навчання є модель аномалії разом з T_s , поріг аномалії, який буде застосований на нових даних. Коли приходить нова вибірка, до неї застосовується така модель, що кожному зразку присвоюється оцінка, s , використовуючи функцію *iforest*, наступним чином:

$$Iforest(fe(W^{Pi}_{mow})) = s,$$

де fe – функція вилучення ознак з рівняння 1, яка переводить зразок до вектора ознак. Якщо оцінка перевищує показник аномалії (тобто $s > T_s$), вибірка вважається аномальною, а домен, на який він посилається, буде позначений як домен, який використовується для обміну даними через DNS.

Блокування шкідливих доменів. Домени, які є аномальними з точки зору трафіку (тобто використовуються для обміну даними), можна розділити на дві категорії: шкідливі та легітимні. Як правило, коли система розгортається в мережі, вона легко знайде легітимні (і, можливо, нелегітимні) служби, які використовують DNS для обміну даними. Як тільки ці домени відображаються та видаляються експертом з безпеки, будь-який новий домен, що з'являється у фазі виявлення аномалій, вважається зловмисним видаленням даних і негайно блокується.

Оцінка ефективності запропонованого методу. Оцінка зосереджується на двох основних цілях:

виявлення малопрпускнуї ексфільтрації шкідливих програм та виявлення високопродуктивних тунелів DNS. З цією метою ми представляємо наш набір даних DNS-трафіку, що складається з доброякісного трафіку, а також тестових об'єктів ексфільтрації DNS. Тестові об'єкти включають (1) Iodine і (2) Dns2tcp (як високопродуктивні інструменти тунелювання), і (3) FrameworkPOS і (4) Backdoor.Win32.Denis (як DNS ексфільтрація зловмисного програмного забезпечення).

Виявлення і коефіцієнти помилкових позитивних результатів для запропонованого методу розглядаються для кожного з тестованих суб'єктів при встановленні сильного обмеження на прийнятний параметр швидкості помилкових позитивних (тобто менше $2 \cdot 10^{-5}$). Виходячи з ручної класифікації випадків використання помилкового позитивного виявлення, робиться висновок, що більшість помилкових позитивних доменів потрапляють під випадки легального обміну даними через DNS (наприклад, пошук антивірусної сигнатури), тому слід виявити, що експерт з питань безпеки повинен перейти до білого списку, щоб уникнути майбутніх помилкових спрацювань. Таким чином, враховуючи, що перші перераховані в білий список, аналізуються помилкові позитивні показники протягом часу (замість кожного домену), вимірюючи кількість нових помилково виявлених доменів на день.

Тестовий набір даних. Наш основний набір даних (позначений як DS) – це один тиждень трафіку DNS, зібраного з підмножини рекурсивних резонансів DNS, керованих компанією «Akamai Technologies». DS розглядається як великомасштабний зразок трафіку DNS з принаймні сто тисячами кінцевих користувачів.

Для проведення додаткового чесного тесту було використано DSpartial. DSpartial містить трафік підмножини трафіку користувачів DS. Тому вона трохи менше десятої частини DS, що робить її більш придатною для порівняння з попередніми дослідженнями.

Таблиця 2

Опис тестових наборів даних

	значення	std	min	середнє	max
DS	$3.5 \cdot 10^7$	$7.8 \cdot 10^6$	$2.2 \cdot 10^7$	$3.7 \cdot 10^7$	$4.7 \cdot 10^7$
DS _{partial}	$2.9 \cdot 10^6$	$4.9 \cdot 10^5$	$1.8 \cdot 10^6$	$2.7 \cdot 10^6$	$4.0 \cdot 10^6$

Протягом одного тижня трафіку DNS, до складу якого входять DS і DS_{partial}, вівся трафік реальних шкідливих комунікацій та інструментів DNS-тунелювання. Через нестачу обміну даними через DNS, можна припустити, що окрім нашого введеного трафіку немає жодних додаткових випадків обміну даними DNS на будь-якому з наборів даних. Кожен з доменів у наборі даних DS представляється у вигляді вектора ознак.

Домен, які використовуються для видалення даних, мають відповідні вектори ознак, які з'являються як відхилення з відносно характеристичних векторів нормальних доменів. Наприклад: Iodine DNS тунелювання має середню довжину запиту, що перевищує 100 символів, тоді як менше 0.01 нормальних доменів поведуться таким чином. Крім того, з Iodine кодуванням за замовчування, встановленим на Base128, ентропія символів зазвичай перевищує 3.0, тоді як у випадку чистого трафіку менше 0.05 трафіку слідує за такою поведінкою.

Об'єкти тестування. Існує чотири об'єкти тестування, які були протестовані:

1) *FrameworkPOS*: шкідливе програмне забезпечення FrameworkPOS [15].

2) *Backdoor.Win32.Denis*: Троянське зловмисне програмне забезпечення Backdoor.Win32.Denis [16] (в цьому документі називається Denis).

3) *Iodine*: Iodine є інструментом тунелювання DNS з відкритим вихідним кодом.

4) *Dns2tcp*: Подібно до Iodine, Dns2tcp також є інструментом тунелювання.

Результати виявлення. Фаза навчання методу застосовується до першого дня набору даних DS, який містить лише доброякісний трафік. Заради ефективності замість тренування понад $24 \cdot 3,5 \cdot 10^7 \approx 8,4 \cdot 10^8$ записів ми відкидаємо первинні доменні з менш ніж десятьма субдоменами за останні $\lambda \cdot n_s$ хвилини як з фаз навчання, так і з етапів виконання. Хоча цей фільтр ігнорує ексфільтрацію зі швидкістю, меншою, ніж 2.5kb на $n_s \cdot \lambda$ (щонайбільше 10 запитів по 255 байтів кожна), нам вдається скоротити наш навчальний набір до $2,1 \cdot 10^5$, тобто 0,25% від його початкового розміру. Параметри моделі тимчасового вікна встановлюються в $n_s = 6$, $\lambda = 60$, таким чином, метод залишається здатним виявляти атаки, які так само повільні, як 0.11b/s, а при гіршому випадку аналіз блокує і повідомляє про свою активність до шести годин після їх перших зібраних даних. Однак, фактично, для двох реальних шкідливих програм, які оцінюються в розділі V, вони сприймаються негайно протягом перших λ хвилин після їх виконання.

Припустимий коефіцієнт помилкового позитивного ставлення дорівнює $v = 2 \cdot 10^{-5}$, тобто він виявить лише домен, які принаймні такі аномальні, як чотири найбільш аномальних доменів у доброякісному трафіку. Фаза тренування з наведеними вище параметрами дає поріг оцінки аномалії $T_s = 0.653$. Виходячи з вихідної моделі і T_s , ми застосовуємо модель до нового трафіку в DS, який не використовувався для навчання.

Фаза виконання моделі працює так само. Кожен $\lambda = 60$ хвилин домен, які мали щонайменше десять субдоменів протягом останніх $\lambda \cdot n_s = 360$ хвилин, стають кандидатами для класифікації. Журнали доменів перетворюються на вектори ознак і модель призначає їм аномалію. Виходячи з фази навчання, домен, аномалії яких перевищують $T_{0.653}$, будуть розглядатися як домен, які використовуються для ексфільтрації

і будуть негайно заблоковані. Перша частина нашого методу оцінювання фокусується на швидкості успішно виявлених досліджуваних. Оцінку аномалії для кожного з досліджуваних досліджують кожні λ хвилин після початку ін'єкції трафіку. Очікуваний результат полягає в тому, щоб кожний показник аномалії кожного випробуваного перевищував заданий поріг $T_s = 0.653$ принаймні в одному зразку для того, щоб вважатися успішним виявленням. Результати вказують на те, що всі тестовані суб'єкти були успішно виявлені методом під час їх виконання.

Оскільки наш метод класифікує домени в дискретному періоді часу (тобто, λ n_s хв.), можна оцінити його на основі загальної кількості доменів, які були неправильно класифіковані як зловмисне вилучення.

Для цього використовується набір даних DS. Так само, як і в оцінці швидкості виявлення, ми тренуємо дані про трафік з першого дня, включеного в DS, і застосовуємо нашу модель до решти трафіку, включеного в DS. Кількість нових помилкових позитивних доменів у часі істотно падає і збігається до максимум одного домену на добу лише через два дні, коли модель була використана для класифікації (див. рис. 2).

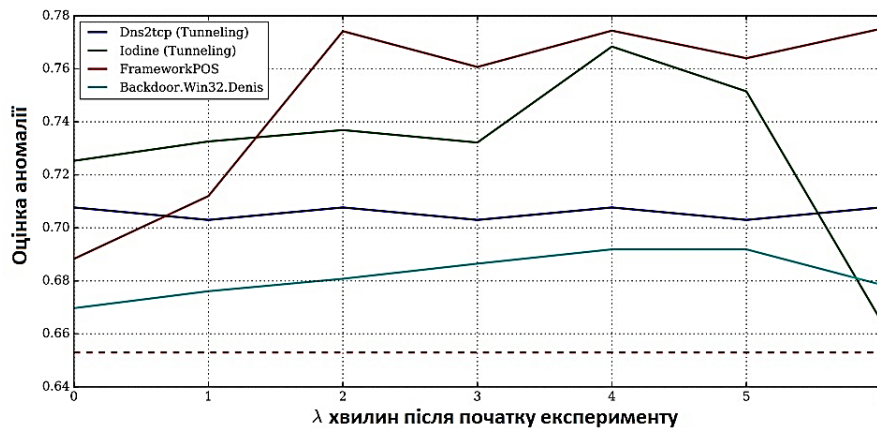


Рис. 2. Аномалія балів доменів, відповідних Dns2tcp, Iodine, FrameworkPOS і Backdoor.Win32.Denis, $T_s = 0.653$, $v = 2 \cdot 10^{-5}$, $n_s = 6$, $\lambda = 60$

Список неправильно класифікованих доменів в основному складається з законних служб безпеки, які неправильно використовують протокол DNS для обміну даними для узагальненої класифікації помилково виявлених доменів). У нашому дозволі ці домени розглядаються як помилкові спрацювання, навіть якщо вони явно використовуються для обміну даними, оскільки передбачається, що вони навмисно встановлені користувачем і тому не повинні бути заблоковані. У реалізації реального світу можна зібрати білий список цих доменів перед застосуванням автоматичного блокування, щоб уникнути помилкового вимкнення служб легалізації. Класифікація хибних спрацювань надана в таблиці 3.

Таблиця 3

Класифікація хибних спрацювань

Категорія	Частота	Приклади
Пошук служб безпеки	12 з 18	sophosxl.net, l2.nessus.org, avts.mcafee.com, a.e.e5.sk
Загальні служби пошуку	4 з 18	kr0.io, dsipsl.net, drtst.com, dsipsl.net
Інші (*)	2 з 18	jacksonriverdev.com, groupinfra.com

Таким чином, запропонований метод продемонстрував можливість виявлення шкідливих запитів на основі DNS.

Висновки

В даній статті запропонований метод, спрямований на виявлення і блокування доменів, які запитуються в потоковому трафіку DNS і використовуються для зловмисного видалення даних DNS. Згідно методу поточковий трафік DNS збирається і перетворюється на вектори відповідності доменів. Після цього попередньо навчений класифікатор класу використовується для виявлення доменів, які обмінюються даними через DNS. Відразу після цього запити на домени, які класифікуються як такі, що використовуються для обміну даними, блокуються на невизначений час. Метод дозволяє його реалізацію в DNS-серверах, якщо вони підтримують протоколювання DNS-трафіку і чорного списку доменів. Описаний метод дає можливість виявляти шкідливі потоки пакетів даних серед звичайних, а постійний моніторинг визначених шкідливих потоків дає можливість виявити зловмисника та дозволяє ізолювати звичайний мережевий потік даних від шкідливого.

References

1. EXPOSURE: Finding Malicious Domains Using Passive DNS Analysis. Bilge, L., Kirda, E., Kruegel,

C., Balduzzi, M.: NDSS, 2017. P. 1–17.

2. Quantitatively analyzing stealthy communication channels. Butler, P. Xu, K., Yao, D.: Proc. Ninth Int'l Conf. Applied Cryptography and Network Security, 2016. P. 238–254.

3. DAMBALLA. Botnet Communication Topologies. Understanding the intricacies of botnet command-and-control. Retrieved from https://www.damballa.com/downloads/r_pubs/WP_Botnet_Communications_Primer.pdf

4. The Federal Bureau of Investigation. Demarest, J. (2017). Statement Before the Senate Judiciary Committee, Subcommittee on Crime and Terrorism, Washington, D.C. Retrieved from <http://www.fbi.gov/news/testimony/taking-down-botnets>.

5. On Botnets that use DNS for Command and Control. Dietrich, C.J., Rossow, C., Freiling, F. C., Bos, H., van Steen, M., Pohlmann, N.: In: Proceedings of European Conference on Computer Network Defense, 2016. P. 9–16.

6. Detecting DNS Tunneling. Farnham, G., Atlas, A.: SANS Institute InfoSec Reading Room, 2013. P. 1–32.

7. A comparison of distance-based semi-supervised fuzzy c-means clustering algorithms. Lai, D.T.C., Garibaldi, J.M.: Fuzzy Systems (FUZZ), In IEEE International Conference, 2015. P. 1580–1586.

8. As the Net Churns: Fast-Flux Botnet Observations. Nazario, J., Holz, T.: In: Conference on Malicious and Unwanted Software (Malware'08), 2008. P. 24–31.

9. Schiller, C. Botnets: The Killer Web Application. Craig Schiller, James R. Binkley. Syngress Publishing, 2012. 464 p.

10. Winning with DNS failures: Strategies for faster botnet detection. Yadav, S., Reddy, A.L.N.: In: Proc. of the 7th International ICST Conference on Security and Privacy in Communication Networks, 2011.

11. R. Matherw, V. Katkar. Survey of Low Rate DoS Attack Detection Mechanisms. International Conference and Workshop on Emerging Trends in Technology (ICWET 2011) – TCET, Mumbai, India. P. 955–958.

12. Zhang Sheng, Zhang Qifei, Pan Xuezheng, Zhu Xuhui. Detection of Low-rate DDoS-Attack Based on Self-Similarity. 2010 Second International Workshop on Education Technology and Computer Science. P. 333–336.

13. Junhan Park, Keisuke Iwai, Hidema Tanaka and Takakazu Kurokawa. Analysis of Slow Read DoS attack. ISITA2014, Melbourne, Australia, October 26–29, 2014. P. 60–64.

14. L. Buczak, P. A. Hanke, G. J. Cancro, M. K. Toma, L. A. Watkins, and J. S. Chavis, “Detection of tunnels in pcap data by random forests,” in Proceedings of the 11th Annual Cyber and Information Security Research Conference. ACM, 2016, p. 16.

15. Alexey Shulmin S. Y. (2017) Use of dns tunneling for cnc communications. Retrieved from <https://securelist.com/use-of-dns-tunneling-for-cnc-communications/78203/>.

16. P. Security. (2016) What is multigrain? learn what makes this pos malware different. Retrieved from <https://www.pandasecurity.com/mediacenter/malware/multigrainmalwarepos/>.

Рецензія/Peer review : 6.5.2019 р. Надрукована/Printed : 2.6.2019 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Говорущенко Т.О.

С.М. ЛИСЕНКО, В.А. ТКАЧУК
Хмельницький національний університет

МЕТОД ТА ПРОГРАМНІ ЗАСОБИ ВИЯВЛЕННЯ КІБЕРАТАКИ ТИПУ R.U.D.Y. НА ОСНОВІ ВИКОРИСТАННЯ АЛГОРИТМУ ВИЗНАЧЕННЯ САМОПОДІБНОСТІ ТРАФІКУ

В роботі представлено метод виявлення DoS-атаки типу R.U.D.Y. на основі використання алгоритму визначення самоподібності мережевого трафіку. Використання запропонованого методу дозволяє здійснювати виявлення DoS-атаки на прикладному рівні моделі OSI. Запропонований метод може бути основою для побудови програмного забезпечення систем виявлення кібератак.

Ключові слова: DoS-атака, R.U.D.Y., R-U-Dead-Yet, виявлення кібератак, показник Херста, самоподібність трафіку.

S. LYSENKO, V. TKACHUK
Khmelnitskyi National University

METHOD AND SOFTWARE FOR DETECTING R.U.D.Y. ATTACK BASED ON THE USAGE OF THE ALGORITHM OF DETERMINING TRAFFIC SELF-SIMILARITY

Antivirus software using signature-based technologies can not normally detect harmful zero-day software, since such new signatures are not available for newly created malware. An analysis of known methods to combat cyberattacks shows their lack of efficiency, so building a new method for detecting cyber-threats is an extremely urgent task. The article presents a new method for detecting a DoS-attack type R.U.D.Y. using the algorithm to determine the self-similarity of network traffic. In the enlarged version of the presentation of the algorithm, the method consists of two parts: the study of the neural network of previously received data about harmful traffic and the analysis of the received network traffic to form conclusions about the possible detection of cyber attacks. Moreover, in order to improve the efficiency of the method, it is expedient to implement the first part before the actual monitoring of network traffic, as the training of the neural network requires a certain amount of time during which the received harmful traffic can be analysed with insufficient efficiency. As the approach uses the neural networks there are several factors, which can predict prediction accuracy. One of them is the diversity of training samples. Most conspicuously, that not all possible feature vectors, that describe different cyberattacks, are adequately represented in the training set. Thus, system can be further improved by choosing more than a few malicious samples for each attack classes. The described method makes it possible to detect harmful streams of data packets among ordinary, and continuous monitoring of certain malicious flows makes it possible to detect an attacker and allows to isolate the usual network data stream from the harmful one. In the enlarged version of the presentation of the algorithm, the method consists of two parts: the study of the neural network of previously received data about harmful traffic and the analysis of the received network traffic to form conclusions about the possible detection of cyber attacks.

Keywords: DoS-attack, R.U.D.Y., R-U-Dead-Yet, cyberattacks detection, Hurst exponent, traffic self-similarity.

Вступ

Ефективне налаштування мережевих каналів зв'язку для запобігання та виявлення DoS-атак або інших аномалій мережевого трафіку є надзвичайно важливою задачею для здійснення ефективного управління комп'ютерною мережею. Для ефективної роботи значної частини існуючих механізмів виявлення DoS-атак потрібна наявність великого об'єму мережевого трафіку. В такому випадку, при використанні таких механізмів захисту, повільні DoS-атаки, які генерують відносно малий об'єм трафіку, залишаються невиявленими.

Прикладами можливих методів виявлення повільних DoS-атак є методи виявлення за допомогою визначення закономірностей в мережевому трафіку. Одним з таких методів є метод виявлення DoS-атак за допомогою визначення ступеня самоподібності трафіку. Такий метод дозволяє визначати прихований шкідливий трафік поміж звичайного у режимі реального часу.

Алгоритм визначення самоподібного трафіку дає можливість виявити шкідливі потоки пакетів серед звичайних, а постійний моніторинг визначених шкідливих потоків може привести до виявлення зловмисника та дозволить ізолювати звичайний TCP-потік від шкідливого.

Використання подібних методів виявлення DoS-атак на мережевому рівні моделі OSI дає можливість використовувати переваги масштабованості, що забезпечує захист тих вузлів мережі, в яких немає власних внутрішніх механізмів захисту.

Пов'язані роботи

Відмінною особливістю деяких DoS-атак прикладного рівня моделі OSI, таких як R.U.D.Y., є генерація невеликого об'єму мережевого трафіку, що ускладнює використання традиційних інструментів виявлення DoS-атак. Повільний мережевий трафік також дозволяє більш ефективно приховувати проведення такої DoS-атаки від тих механізмів захисту, принцип дії яких заснований на аналізі високошвидкісного трафіку. Саму тому було проведено ряд досліджень з метою визначення нових механізмів виявлення повільних DoS-атак.

Так, наприклад, у роботі [1] були представлені можливі механізми виявлення повільних DoS-атак, серед яких метод виявлення на основі визначення самоподібності трафіку. Як зазначено у даній роботі, ефективність виявлення DoS-атак методом визначення самоподібності значною мірою залежить від бази даних сигнатур, використовуваних для порівняння трафіку та самих алгоритмів порівняння. Також було

зазначено, що перевагою такого методу є можливість масштабування, а недоліком є потреба в додаткових ресурсах оперативної пам'яті.

Властивість самоподібності трафіку, яка лежить в основі розроблюваного методу виявлення кібератаки типу R.U.D.Y. була досліджена у роботах [2] та [3]. В даних роботах було доведено, що для мережевого трафіку характерна властивість самоподібності, яка відображається у вигляді структурної подібності на протязі усіх часових відрізків, протягом яких був здійснений моніторинг Ethernet трафіку.

Реалізація та опис можливого алгоритму виявлення DDoS-атак на основі визначення самоподібності трафіку були представлені у роботі [4]. Результати проведених експериментів показують, що методи виявлення на основі самоподібності дають можливість виявляти шкідливий трафік поміж звичайного у режимі реального часу.

У роботі [5] був проведений статистичний аналіз Ethernet LAN трафіку та було надане пояснення виникнення самоподібності з точки зору фізики. Аналогічні дослідження були проведені та описані у роботі [6] для високошвидкісного трафіку.

У роботі [7] представлений приклад використання методів машинного навчання для виявлення кібератаки типу R.U.D.Y. за допомогою визначення характеристик мережевої поведінки даної атаки на мережевому рівні моделі OSI. Як зазначено у даній статті, найбільш важливими характеристиками поведінки, за якими можливе виявлення атаки є розмір трафіку, самоподібність між пакетами та швидкість передачі даних. При чому у роботі було зазначено, що значна частина механізмів захисту від таких DoS-атак включають в себе також моніторинг розподілення та використання системних ресурсів сервера, таких як завантаженість центрального процесора та оперативної пам'яті, а також моніторинг відкритих мережевих з'єднань.

Самоподібність мережевого трафіку

В загальному випадку мережевий трафік можна представити у вигляді фракталу. В широкому розумінні фрактал означає фігуру, малі частини якої в довільному збільшенні є подібними до неї самої. Іншими словами певний об'єкт або явище можна вважати самоподібним, якщо має місце точний або наближений збіг такого об'єкта або явища з частиною самого себе. Важливою властивістю будь-якого фракталу, а отже і мережевого трафіку є властивість самоподібності. Так як мережевий трафік можна масштабувати тільки до певної фізичної межі, то властивість самоподібності трафіку також зберігається до певної межі.

Самоподібність мережевого трафіку проявляється у вигляді схожості частоти отриманих пакетів даних в різних часових масштабах, що при різному масштабуванні нагадує форму фракталу.

Через те що самоподібність є випадковим процесом, ступінь самоподібності може бути визначений за допомогою так званого коефіцієнта Херста.

Коефіцієнт Херста

Для визначення ступеня самоподібності трафіку був використаний так званий коефіцієнт Херста. В загальному випадку даний коефіцієнт представляє собою величину, яка характеризує схильність певного процесу до слідування певним тенденціям. Стосовно визначення самоподібності трафіку, коефіцієнт Херста представляє собою величину, яка використовується для аналізу часових рядів, протягом яких був здійснений збір мережевого трафіку.

Коефіцієнт Херста може приймати значення від 0 до 1. Зменшення цієї величини означає що затримка між двома однаковими парами значень в часовому ряді збільшується. Послідовності, для яких $H > 0,5$, зберігають наявну тенденцію, тобто зростання в минулому більш імовірно призведе до зростання в майбутньому, і навпаки. При значенні 0,5 явної тенденції не виражено, а при менших значеннях будь-яка тенденція прагне змінитися на протилежну.

Дана величина визначається як функція відрізка часу часового ряду наступним чином:

$$E \left[\frac{R(n)}{S(n)} \right] = Cn^H, n \rightarrow \infty,$$

де $R(n)$ – розмах накопичених відхилень перших n значень від середнього значення ряду;

$S(n)$ – стандартне відхилення;

$E[x]$ – математичне очікування;

n – величина проміжку часу;

C – константа.

Для найбільш точного визначення коефіцієнта Херста, часовий відрізок повинен бути достатньо великим. Тому ефективність виявлення DoS-атаки методом визначення самоподібності трафіку значно залежить від величини проміжку часу, протягом якого був здійснений збір та аналіз мережевого трафіку.

Математичне пояснення самоподібності мережевого трафіку

Якщо надходження мережевого трафіку представити у вигляді випадкового процесу, то такий процес можна розділити на дискретні проміжки часу у вигляді $X = (X_1, X_2, \dots)$. Якщо проміжки часу прийняти рівними n , то такий випадковий процес буде мати вигляд $X^{(n)} = (X_1^n, X_2^n, \dots)$, компоненти якого

визначаються за формулою:

$$X_k^{(n)} \triangleq \frac{(X_{kn-n+1} + \dots + X_{kn})}{n}, n, k \in \mathbb{N}$$

Для опису залежності випадкових процесів X та $X^{(n)}$ доцільно визначити коефіцієнти кореляції $\Gamma(q)$, який описує залежність процесу X та коефіцієнт $r_n(q)$, який описує процес $X^{(n)}$. В загальному випадку процес X можна вважати самоподібним, якщо коефіцієнт Херста приймає значення від 0,5 до 1 та виконується рівність:

$$r_n(q) = \Gamma(q), n \in \mathbb{Z}, n \in \{2, 3, \dots\}$$

В такому випадку, самоподібний процес X є дуже схожим до процесу $X^{(n)}$, так як коефіцієнт кореляції $\Gamma(q)$ не змінюється після виконання масштабування по часовим відріzkам довжиною n . Іншими словами, частота отримання пакетів даних на певному часовому відрізку приймає приблизно такий же самий вигляд після виконання масштабування, що при виконанні графічного відображення може приймати форму відповідного фракталу.

Взаємозв'язок між коефіцієнтом Херста та самоподібністю мережевого трафіку

Коефіцієнт Херста, H , у відношенні визначення самоподібності мережевого трафіку може визначати стан або відсутності властивості самоподібності або її наявності до певного ступеня.

Так, в загальному випадку, якщо коефіцієнт H приймає значення 0,5, то це вказує на те, що події є випадковими та між ними немає довгострокової залежності. В такому випадку мережевий трафік не є самоподібним.

Якщо коефіцієнт H приймає значення від 0,5 до 1, то це означає, що досліджуваний часовий відрізок представляє собою безперервну серію часу. Тобто чим більше значення приймає коефіцієнт H , тим більший ступінь довгострокової залежності між подіями та тим більший ступінь самоподібності. При значенні коефіцієнта Херста близького до 1 мережевий трафік приймає максимальне значення ступеня самоподібності, що означає, що при будь-якому масштабуванні часових рядів частота надходження пакетів даних буде приймати максимально схожий вигляд. В такому випадку, фрактальні властивості самоподібного процесу будуть відображені найбільш точно, а при графічному відображенні мережевого трафіку з таким високим ступенем самоподібності будуть добре помітні фрактальні відображення частоти надходження пакетів даних.

Алгоритм визначення самоподібності мережевого трафіку

Для визначення коефіцієнта Херста розділимо тривалість надходження мережевого трафіку на фіксовані часові відрізки. Для опису часу надходження трафіку введемо часовий домен T , який розглядається як незалежна змінна для аналізу часових явищ. Отримані фіксовані часові відрізки X_i описуються за формулою $X = (X_i | i = 0, 1, 2, \dots)$, де X – загальна тривалість моніторингу трафіку. Середнє значення частоти надходження пакетів позначимо через μ_i .

Для опису значення різниці максимальної та мінімальної частоти на кожному з часових відрізків визначимо функцію $R(T)$, яка визначається за формулою [4]:

$$R(T) = \max X(t, T) - \min X(t, T), \text{ де } 1 \leq t \leq T$$

Для опису середнього відхилення частоти надходження пакетів даних від середнього значення частоти визначимо середнє квадратичне відхилення $S(T)$, яке визначається за формулою [4]:

$$S(T) = \left\{ \frac{1}{T} \sum_{i=1}^T [X_i - \mu_i]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}, \tag{1}$$

де $X(t, T) = \sum_{i=1}^t [X_i - \mu_i]$

В такому випадку відношення $\frac{R(T)}{S(T)}$ приймає вигляд [4]:

$$\frac{R(T)}{S(T)} = c T^H \sim T^H, T \rightarrow \infty, \tag{2}$$

де H – коефіцієнт Херста;
 c – константа.

Тоді коефіцієнт Херста обчислюється за формулою [4]:

$$H = \frac{\ln\left(\frac{R(T)}{S(T)}\right)}{\ln T} - \frac{\ln c}{\ln T} \quad (3)$$

В загальному випадку, для визначення ступеня самоподібності виконується обчислення значення функції $R_i(N)$ та стандартного відхилення для кожного з часових відрізків довжиною N .

Далі для кожного з часових відрізків визначається відношення $\frac{R_i(N)}{S_i(N)}$ та обчислюється середнє значення $\frac{R(N)}{S(N)}$, при чому має виконуватись рівність [4]:

$$\frac{R(N)}{S(N)} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \frac{R_i(N)}{S_i(N)} \quad (4)$$

Також варто зазначити, що при збільшенні значення N , потрібно знову обчислювати відношення (4) та визначити коефіцієнт Херста за формулою (3), так як зміна кількості досліджуваних часових відрізків призводить до перерахунку значення коефіцієнта Херста, та, відповідно, до отримання нового значення ступеня самоподібності трафіку.

Постановка задачі

Завдяки особливостям повільних DoS-атак, які значно збільшують складність їх виявлення та великі загрози, які вони можуть спричинити, актуальною науково-практичною задачею є розроблення нових методів виявлення таких кібератак та проведення досліджень з метою визначення закономірностей їх мережевої поведінки. Виявлення DoS-атаки типу R.U.D.Y. здійснюється за допомогою аналізу мережевого трафіку, визначення його ступеня самоподібності та формування висновку щодо факту проведення атаки за допомогою методів машинного навчання.

Метод та програмні засоби виявлення кібератаки типу R.U.D.Y. на основі використання алгоритму визначення самоподібності трафіку

В даній статті запропоновано метод виявлення DoS-атаки типу R.U.D.Y. за допомогою визначення ступеня самоподібності трафіку. Робота методу полягає у здійсненні аналізу мережевого трафіку, визначення ступеня самоподібності за допомогою коефіцієнта Херста та формування відповідного результату за допомогою використання апарату нейронних мереж.

В укрупненому варіанті представлення роботи алгоритму, метод складається з двох частин: навчання нейронної мережі попередньо отриманими даними про шкідливий трафік та виконання аналізу отриманого мережевого трафіку для формування висновків щодо можливого виявлення кібератаки. При чому, для підвищення ефективності методу доцільно здійснювати виконання першої частини перед початком реального моніторингу мережевого трафіку, так як навчання нейронної мережі вимагає певного часу, протягом якого отриманий шкідливий трафік може бути проаналізований з недостатньою ефективністю. Укрупнена схема функціонування методу виявлення кібератаки типу R.U.D.Y. на основі використання алгоритму визначення самоподібності трафіку зображена на рис. 1.



Рис. 1. Укрупнена схема функціонування методу виявлення кібератаки типу R.U.D.Y. на основі використання алгоритму визначення самоподібності трафіку

У більш детальному варіанті представлення етап навчання складається з наступних кроків: збір вхідних даних для навчання з попередньо отриманого шкідливого трафіку, підготовка та нормалізація даних, навчання нейронної мережі. Етап виявлення складається з наступних кроків: збір даних з отриманого мережевого трафіку, підготовка та нормалізація даних, визначення ступеня самоподібності. Загальна схема функціонування методу виявлення кібератаки типу R.U.D.Y. на основі використання алгоритму визначення самоподібності трафіку зображена на рис. 2.

При використанні нейронної мережі для здійснення виявлення атаки використовується її здатність виявляти закономірності між вхідними та вихідними даними. Стосовно аналізу мережевого трафіку та визначення ступеня самоподібності, використання цієї властивості дозволяє виявляти шкідливий трафік на основі даних, які були відсутні при виконанні навчання. Іншими словами, використання нейронної мережі з алгоритмом визначення самоподібності дає можливість отримати вірний результат щодо стану системи на ранньому етапі виявлення.

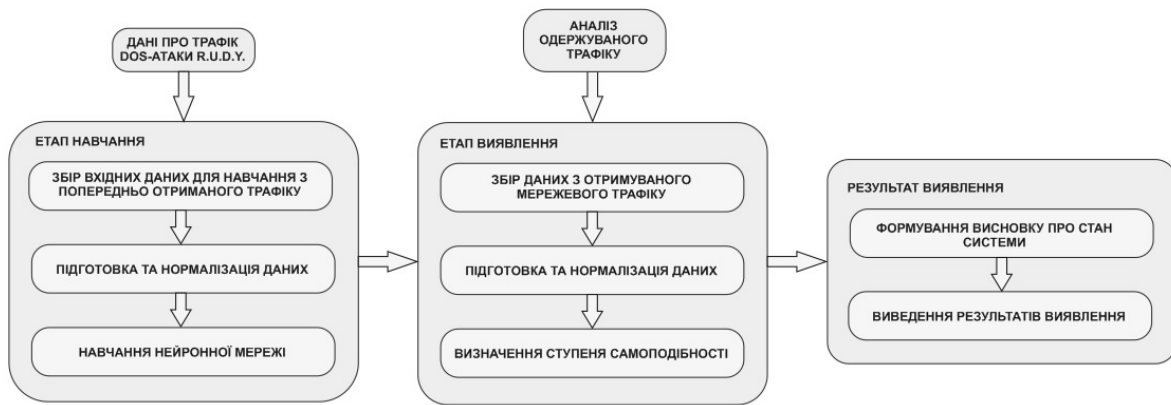


Рис. 2. Загальна схема функціонування методу виявлення кібератаки типу R.U.D.Y. на основі використання алгоритму визначення самоподібності трафіку

Процес навчання нейронної мережі, її структура, вхідні та вихідні дані

Для здійснення розпізнавання зібраного мережевого трафіку використовується рекурентна нейронна мережа. В основі методу розпізнавання мережевого трафіку нейронною мережею лежить алгоритм визначення самоподібності трафіку. Процес навчання нейронної мережі полягає у здійсненні аналізу попередньо зібраного трафіку атаки R.U.D.Y. та визначенні відношення між ступенями самоподібності на різних часових відрізках між попередньо зібраним трафіком атаки R.U.D.Y. та отриманим відфільтрованим мережевим трафіком. Набір значень та кількість часових відрізків визначаються при виконанні розподілу загального часового ряду. Такий розподіл часового ряду, який відображає кількість та частоту отриманих пакетів даних можна реалізувати за допомогою розбиття загального ряду на N однакових інтервалів. В такому випадку, необхідна кількість часових відрізків для здійснення максимально ефективного виявлення атаки визначається експериментальним шляхом. Використання такого розподілу дозволяє відобразити властивість масштабованості, яка характерна самоподібним процесам.

Під час аналізу отриманого трафіку для виявлення атаки, важливою перевагою рекурентної нейронної мережі є її висока ефективність обробки серій подій у часі. Так як кількість часових відрізків та кількість зібраних пакетів на даних відрізках може бути різною, то зручною виявляється властивість рекурентних нейронних мереж використовувати свою внутрішню пам'ять для обробки послідовностей довільної довжини.

Одним із недоліків рекурентних нейронних мереж є необхідність створення для кожного досліджуваного дискретного інтервалу часу свого шару нейронів, що може збільшувати загальну обчислювальну складність розроблюваної системи. Також варто зазначити, що атака R.U.D.Y. спроектована таким чином, що після створення певної кількості підключень до сервера, кожен з потоків зазвичай здійснює відправку пакетів з приблизно однаковою частотою. Тому, для забезпечення можливості здійснення аналізу отриманого трафіку у режимі реального часу використовується механізм накопичення пакетів до певної мінімальної величини, k .

Величиною k , можна вважати ту кількість отриманих пакетів, яка лежить між кількістю IP-пакетів, які створює атака R.U.D.Y., що фактично можуть спричинити DoS-стан атакваної комп'ютерної системи та між мінімальним значенням кількості пакетів, величина якого достатня для отримання достовірного значення ступеня самоподібності. В такому випадку, наступним моментом мінімального досліджуваного інтервалу часу можна вважати момент здійснення даного накопичення.

Структура використовуваної рекурентної нейронної мережі зображена на рис. 3.

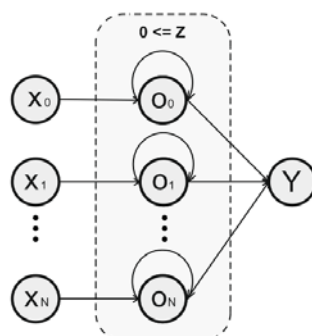


Рис. 3. Структура нейронної мережі

Як показано на рис. 3, кількість нейронів вхідного шару та кількість елементів у внутрішньому шарі дорівнює кількості часових відрізків N .

Використовувану рекурентну нейронну мережу можна представити у вигляді сукупності

розгорнутих у часі нейронних мереж з прямим розповсюдженням сигналу. В такому випадку кожен з елементів $O_0 \dots O_N$, які показані на рис. 3 можна представити у розгорнутому вигляді, як зображено на рис. 4.

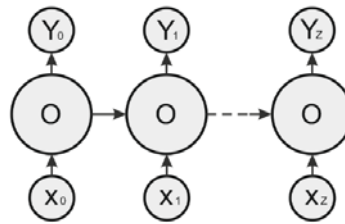


Рис. 4. Структура внутрішніх нейронів, розгорнутих у часі

Як показано на рис. 4, кількість внутрішніх розгортки дорівнює змінній Z , величина якої залежить від мінімальної довжини інтервалу, k , таким чином, що послідовний розподіл загального часового ряду T , відбувається розбиттям на N відрізків, після чого отримані нові часові відрізки, також діляться на N частин, поки довжина останнього відрізка не буде менша довжини відрізка з k пакетів. Значення Z дорівнює кількості ітерацій процедури розбиття часових відрізків.

За характером навчання використовується нейронна мережа належить до класу навчання з учителем. Для здійснення навчання використовується алгоритм зворотного поширення помилки. Завдяки наявності попередньо зібраного трафіку атаки R.U.D.Y., стають відомі правильні відповіді, які нейронна мережа повинна згенерувати на останньому етапі роботи. При отриманні помилкової відповіді на кінцевому шарі мережі, визначається значення помилки на усіх попередніх шарах.

Перед початком навчання нейронної мережі та при отриманні мережових пакетів виконується попередня підготовка та нормалізація даних. Такі початкові вхідні дані складаються з мережового трафіку, який представлений у вигляді множини POST HTTP запитів, та відповідної послідовності отриманих IP-пакетів, які отримуються під час надсилання даних при здійсненні атаки. При чому, для ідентифікації мережових потоків і подальшого виявлення атаки здійснюється аналіз лише тих частин заголовків HTTP-запитів та IP-пакетів, значення яких потрібні для виявлення атаки. В такому випадку, кожен отриманий POST HTTP запит можна представити у вигляді кортежу:

$$X_1 = (\text{Content-Length}, \text{Connection}),$$

де **Content-Length** – розмір даних у байтах. Великі значення **Content-Length** свідчать про потенційно небезпечний трафік, характерний для кібератаки R.U.D.Y. Зчитування та аналіз даного поля заголовка дозволяє ідентифікувати та ізолювати шкідливий потік даних поміж звичайних потоків;

Connctction – відомості про стан підключення. Моніторинг статусу підключення потоків дозволяє визначити початок та закінчення передачі пакетів даних з конкретної IP-адреси.

Кожен з отриманих IP-пакетів можна представити у вигляді кортежу:

$$X_2 = (\text{Size}, \text{Source}, \text{Time}),$$

де **Size** – розмір IP-пакету, включаючи заголовок та дані. Подібні розміри IP-пакетів, які були отримані з певного POST HTTP запиту, та які відправлялися з низькою частотою також свідчать про небезпечний трафік, характерний для атаки R.U.D.Y.;

Source – IP-адреса відправника пакета. Визначення IP-адрес дозволяє ідентифікувати IP-адресу комп'ютера зловмисника;

Time – час отримання IP-пакету. Перед початком визначення ступеня самоподібності множина значень часу надходження IP-пакетів дає можливість створити графік надходження пакетів на відповідних часових відрізках та сформувані вхідні дані для нейронної мережі.

На етапі навчання нейронної мережі попередньо зібраний трафік атаки R.U.D.Y. зберігається у вигляді набору бінарних файлів, кожен з яких представляє трафік з певною, наперед визначеною кількістю підключень до сервера. Вхідні дані, які записані в цих файлах, зберігаються у вигляді послідовності записів, кожен з яких можна представити у вигляді кортежу:

$$(X_1, X_{2_1} \dots X_{2_N}),$$

де X_1 – кортеж, який описує POST HTTP підключення;

$X_{2_1} \dots X_{2_N}$ – набір кортежів, які описують отримані IP-пакети;

N – загальна кількість IP-пакетів.

На етапі аналізу нейронною мережею отриманого трафіку, дані про трафік представляються у вигляді наборів кортежів типу X_1 та X_2 у невизначеному порядку, так як до сервера може бути здійснено безліч різних POST HTTP запитів, кожен з яких буди містити в собі пакети даних у невизначеній кількості, які будуть відправлятися у різні моменти часу. В такому випадку, для ідентифікації певного POST HTTP запиту з відправником цього запиту, використовується механізм зчитування адреси та номера порта сокета

відправника даних. Це дозволяє визначити спільне джерело отримання POST HTTP запитів, а для визначення приналежності між множиною отриманих IP-пакетів та відповідним POST HTTP запитом, виконується зчитування даних сокетом з заданим буфером достатнього розміру, що дозволяє одночасно зчитувати заголовки POST HTTP запитів та IP-пакетів.

Підготовка даних для нейронної мережі полягає у створенні вектора нормалізованих даних для нейронів вхідного шару на основі множини кортежів типу X_2 . Такі вектори складаються з наборів цілих чисел, кожне з яких означає кількість отриманих IP-пакетів на певному конкретному моменті часу. При чому мінімальною дискретною одиницею часу вважається 1 мс.. Вихідними значеннями нейронів внутрішніх шарів є значення ступеня самоподібності при заданих вхідних векторах на різних часових інтервалах та підінтервалах. Значенням вихідного шару, який складається з одного нейрону, є число, яке визначає ступінь схожості проаналізованого мережевого трафіку з попередньо зібраним трафіком DoS-атаки R.U.D.Y.

Експерименти

Для оцінки ефективності запропонованого методу виявлення кібератаки типу R.U.D.Y. було проведено ряд експериментів. Для здійснення можливості проведення таких експериментів та побудови відповідного експериментального середовища зручно використовувати програмні засоби віртуалізації, такі як, наприклад, VirtualBox.

Використовуване експериментальне середовище зображене на рис. 5.

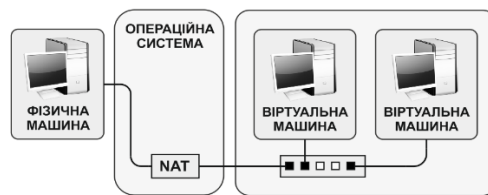


Рис. 5. Експериментальне середовище

Як показано на рис. 5, експериментальне середовище складається з комп'ютера-хоста, який представляє собою фізичну машину та двох віртуальних машин. При чому, одна з віртуальних машин виконує роль нападника, а інша машина – роль веб-сервера, на який планується здійснення DoS-атаки.

Для виконання експериментів була здійснена атака на віртуальний веб-сервер Apache з віртуальної машини нападника. Основними параметрами DoS-атаки R.U.D.Y. є кількість мережевих підключень до сервера, на який планується здійснення атаки; значення поля Content-Length відповідних POST HTTP запитів та частота відправки пакетів з кожного відкритого підключення. Також, для здійснення атаки потрібно вказати URL веб-сервера. Для виконання експериментів був використаний URL <http://192.168.1.1>, що представляє собою локальну IP-адресу віртуальної машини веб-сервера. Для віртуальної машини нападника була призначена IP-адреса 192.168.1.2. Параметри DoS-атаки R.U.D.Y., які використовувались для проведення експериментів представлені у таблиці 1.

Таблиця 1

Параметри DoS-атаки R.U.D.Y. для проведення експериментів

Параметр атаки R.U.D.Y.	Значення параметра атаки R.U.D.Y.
Кількість підключень	50
Значення Content-Length	100000000
Частота відправки пакетів	1 с

Використаний у роботі алгоритм визначення самоподібності трафіку може бути протестований за допомогою зміни вхідних значень та порівняння відповідних отриманих вихідних результатів. Параметри алгоритму визначення самоподібності трафіку, які були використані під час виконання експерименту, представлені у таблиці 2.

Таблиця 2

Параметри алгоритму визначення самоподібності трафіку

Параметр алгоритму	Значення параметра алгоритму
Загальна величина часового ряду, T	10 с
Кількість часових відрізків, i	12
Кількість пакетів даних на кожному з часових відрізків, $k_1 \dots k_i$	~50

Можливі результати визначення коефіцієнта Херста на кожному з часових відрізків зображені на рис. 6.

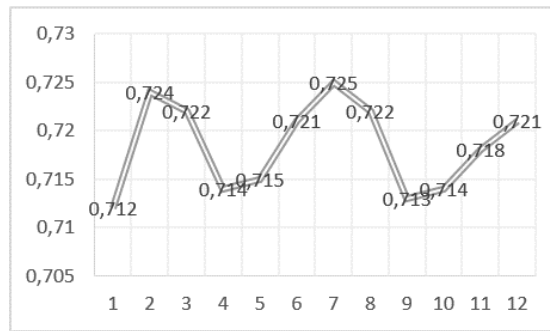


Рис. 6. Результати визначення коефіцієнта Херста

Як показано на рис. 6, коефіцієнт Херста в загальному приймає значення близько 0,7, що свідчить про те, що протестований трафік є частково самоподібним.

Таким чином, запропонований метод виявлення може бути основою для побудови програмного забезпечення систем виявлення DoS-атак типу R.U.D.Y.

Висновки

В даній статті описано метод виявлення DoS-атаки типу R.U.D.Y. за допомогою алгоритму визначення самоподібності мережевого трафіку. Описаний метод дає можливість виявляти шкідливі потоки пакетів даних серед звичайних, а постійний моніторинг визначених шкідливих потоків дає можливість виявити зловмисника та дозволяє ізолювати звичайний мережевий потік даних від шкідливого.

Література

1. R. Matherw, V. Katkar. Survey of Low Rate DoS Attack Detection Mechanisms. International Conference and Workshop on Emerging Trends in Technology (ICWET 2011) – TCET, Mumbai, India. P. 955–958.
2. W.E. Leland, M.S. Taqqu, W. Willinger, D.V. Wilson. On the Self-Similar Nature of Ethernet Traffic. (Originally Published in: Proc. SIGCOMM '93, Vol. 23, No. 4, October 1993). P. 202–213.
3. Will E. Leland, Murad S. Taqqu, Walter Willinger, Daniel V. Wilson. On the Self-Similar Nature of Ethernet Traffic (Extended Version). IEEE/ACM Transactions on Networking, Vol. 2, No. 1, February 1994.
4. Zhang Sheng, Zhang Qifei, Pan Xuezheng, Zhu Xuhui. Detection of Low-rate DDoS-Attack Based on Self-Similarity. 2010 Second International Workshop on Education Technology and Computer Science. P. 333–336.
5. Walter Willinger, Murad S. Taqqu, Robert Sherman, Daniel V. Wilson. Self-Similarity Through High-Variability: Statistical Analysis of Ethernet LAN Traffic at the Source Level. IEEE/ACM Transactions on Networking, Vol. 5, No. 1, February 1997. P. 71–86.
6. Walter Willinger, Murad S. Taqqu, Will E. Leland, Daniel V. Willson. Self-Similarity in High-Speed Packet Traffic: Analysis and Modeling of Ethernet Traffic Measurements. Statistical Science 1995, Vol. 10, No. 1, P. 67–85.
7. Maryam M. Najafabadi, Taghi M. Khoshgoftaar, Amri Napolitano, Charles Wheelus. RUDY Attack. Detection at the Network Level and Its Important Features. Proceedings of the Twenty-Ninth International Florida Artificial Intelligence Research Society Conference. P. 282–287.
8. Payal Jain, Juhi Jain, Zatin Gupta. Mitigation of Denial of Service (DoS) Attack. IJCEM International Journal of Computational Engineering & Management, Vol. 11, January 201, ISSN (Online): 2230-7893, www.IJCEM.org. P. 38–44.
9. Junhan Park, Keisuke Iwai, Hidema Tanaka and Takakazu Kurokawa. Analysis of Slow Read DoS attack. ISITA2014, Melbourne, Australia, October 26–29, 2014. P. 60–64.
10. Gabriel Macia-Fernandez, Jesus E. Diaz-Verdejo, Pedro Garcia-Teodoro. Evaluation of a low-rate DoS attack against application servers. Department of Signal Theory, Telematics and Communications, E.T.S. Computer and Telecommunications Engineering, University of Granada, c/ Danielo Aranda, s/n 18071 Granada, Spain. Computers & Security 27 (2008). P. 335–354.
11. Evan Damon, Julian Dale, Evaristo Laron, Jens Mache, Nathan Land, Richard Weiss. Hands-On Denial of Service Lab Exercises Using Slowloris and RUDY. P. 21–29.

Рецензія/Peer review : 21.5.2019 р.

Надрукована/Printed : 2.6.2019 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Говорущенко Т.О.

ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ РЕКУРСИВНОГО ПОШУКУ КЛЮЧОВИХ ТЕРМІНІВ У ЦИФРОВИХ ТЕКСТАХ

В статті розглянуто інформаційну технологію рекурсивного пошуку ключових термінів у цифрових текстах, яка проводить аналіз текстового контенту із використанням методу дисперсійної оцінки та без використання лексичних баз даних корпусів слів. Характерною рисою запропонованої інформаційної технології є використання рекурсивних складових при пошуку ключових термінів. Процес автоматизованого аналізу цифрового тексту шляхом рекурсивного пошуку ключових термінів із використанням методу дисперсійного оцінювання складається з ряду етапів перетворення інформації, які у сукупності формують інформаційну технологію рекурсивного пошуку ключових термінів. Розроблена інформаційна технологія рекурсивного пошуку ключових термінів була реалізована в тестовому програмному продукті. Вхідними даними для системи є електронний документ із цифровим текстом, а вихідними даними є множина ключових термінів, що відповідає досліджуваному фрагменту текстового контенту електронного документу. За допомогою розробленого тестового програмного забезпечення були проведені дослідження, що підтвердили можливість ефективно автоматизовано формувати множини ключових семантичних термінів текстів із показниками точності пошуку до 89,6% й повноти пошуку до 93,3%.

Результати порівняння ефективності інформаційної технології рекурсивного пошуку ключових термінів у цифрових текстах із аналогічними результатами для технологій, що використовують лексичні бази даних корпусів слів для ідентифікації слів у текстах, є неоднозначними. У 42,3% випадках використання рекурсивного пошуку негативно вплинуло на якість результату, проте в 18,6% випадків такий підхід виявив кращий результат. Перевагами розробленої інформаційної технології рекурсивного пошуку ключових термінів у цифрових текстах, яка проводить аналіз текстового контенту із використанням методу дисперсійної оцінки, є відсутність необхідності використання лексичних баз даних корпусів слів, суттєве прискорення швидкодії, можливість використання для текстів різними мовами, можливість використання для текстів із кількома мовами, кращі результати під час обробки вузькоспеціалізованого контенту. Дана інформаційна технологія може бути ефективно використана для аналізу текстів із невідомими властивостями тематики та мови.

Ключові слова: цифровий документ, ключові терміни, дисперсійна оцінка.

O. MAZURETS, O. KOVAL
Khmelnitskyi National University

INFORMATION TECHNOLOGY FOR RECURSIONAL DEFINITION OF KEY TERMS IN DIGITAL TEXTS

In the article the information technology for recursional definition of semantic key terms in digital texts is considered, which conducts the analysis of text content using the method of dispersion evaluation and without the use of lexical databases of word cases. A characteristic feature of the proposed information technology is the use of recursive components in the search for key terms. The process of automated analysis of digital text through recursional search of key terms using the dispersion evaluation method consists of series of stages of the transformation of information, which collectively form the information technology for recursional definition of semantic key terms. The information technology for recursional definition of semantic key terms has been introduced in the test software product. The input data for the system is an electronic document with digital text, and the output data is a set of key terms that correspond to the investigated fragment of the text content of the electronic document. With the help of developed test software, studies were conducted that confirmed the ability to effectively formulate a set of key semantic terms of texts with search precision up to 89.6% and search recall up to 93.3%. The results of the comparison of the effectiveness of information technology for recursional definition of semantic key terms in digital texts with similar results for technology that use lexical databases of word cases to identify words in texts are ambiguous. In 42.3% of cases, the use of recursional definition negatively affected the quality of the result, but in 18.6% of cases, this approach has shown better result. The advantages of the developed information technology for recursional definition of semantic key terms in digital texts, which conducts analysis of text content using the dispersion evaluation method, are the absence of the need to use lexical database of word cases, significant acceleration of speed, the possibility of using for texts in different languages, the possibility of using for texts in several languages, better results in handling highly specialized content. This information technology can be effectively used to analyse texts with unknown properties of the subject and language.

Keywords: digital document, key terms, disperse evaluation.

Постановка проблеми в загальному вигляді

З інформаційним розвитком суспільства зростає кількість інформації, яку людині потрібно опрацювати. Найбільш поширеним є текстовий формат передачі інформації, оскільки він є найбільш звичним для людини. Але при великих обсягах тексту втрачається якість його сприйняття. Крім того, часто можна зустріти текст, який не відповідає тому, за що його видають. Тому зростає потреба в попередньому аналізі такого тексту. Такий аналіз полягає в швидкому отриманні сенсу тексту. Для людини дана операція виснажлива і може відбуватися доволі довго в залежності від обсягу текстового контенту.

Семантичний аналіз текстів є складним математичним завданням, рішення якого застосовується у процесі створення штучного інтелекту, при цьому воно ускладнюється необхідністю обробки природної мови. Дані якісного семантичного аналізу також можуть використовуватися в торгівлі для аналізу попиту на товари за отриманими відкликаннями, у системах автоматичного перекладу, пошукових системах тощо. Поняття ключових термінів як носіїв найбільш семантично вагової інформації про текст активно

використовується в інформатиці, зокрема, завданнях інформаційного пошуку. Для інформаційних технологій даний напрямок не є новим і знайшов своє відображення переважно в SEO-системах. Існує багато програмних продуктів і теоретичних пропозицій, як отримати сенс тексту, але не існує єдиного рішення, яке б остаточно вирішувало дану проблему.

Множина ключових термінів тексту є найбільш семантично стиснутим результатом семантичного аналізу тексту [1], й пошук ефективних методів автоматизованого формування таких множин відкриває можливість розв'язання багатьох похідних задач.

Аналіз останніх досліджень

Семантичний аналіз тексту є етапом у послідовності дій алгоритмів автоматичного розуміння текстів, що полягають у виділенні семантично важливих конструкцій, семантичних відношень, формуванні семантичного подання текстів. Один з можливих варіантів відображення семантичного подання – це структура, що складається із текстових елементів. Глибина семантичного аналізу може бути різною [2], однак в існуючих системах найчастіше будується тільки згорнуте синтаксико-семантичне подання тексту чи його окремих фрагментів, до яких відносять анотації, реферати та переліки ключових термінів [3].

Проблему автоматизованої аналітичної обробки текстової інформації намагаються вирішити багато вітчизняних та іноземних авторів, серед яких можна відзначити роботи Д.В. Ланде, В.Е. Снитюка, В.І. Горькової, Х.П. Луна, В.С. Берзона, І.П. Севбо, Є.А. Борохова, В.П. Леонова, С.І. Гінді та інших. Дослідження в напрямку автоматизації обробки текстів у Європі та США привертають увагу відомих приватних фірм і державних установ найвищого рівня. Європейський Союз наразі координує ряд програм у галузі автоматичної обробки тексту, зокрема Human Language Technology Sector of the Information Society Technologies (IST) Programme. Основні вишукування присвячені автоматизації процесу синтаксичного аналізу цифрових текстів.

Більшість існуючих програмних систем, створених для автоматизованої аналітичної обробки цифрових текстів, призначені переважно для SEO-аналізу текстів. Наприклад, аналізатор від біржі контенту «Адвего» [4] вираховує кількість слів, кількість граматичних помилок і т.п. Сервіс також дозволяє побачити перелік ключових слів, які вираховуються за методом частотної оцінки, та забезпечує аналіз текстів на плагіат. Багатофункціональна SEO-платформа «Serpstat» [5] забезпечує глибинний аналіз текстового контенту, аналіз пошукових питань, розподіл запитів по дереву сайту, пошук схожих фраз тощо; аналіз ключових слів, зокрема, допомагає використовувати найефективніші ключові слова в контенті й рекламних оголошеннях для розширення присутності у комерційній ніші. Текстовий аналізатор від компанії «Seozor» [6] визначає вагу слів в тексті для складання анкор-листа.

Для автоматизації пошуку ключових слів використовуються різноманітні методи аналізу текстів, таких як частотна оцінка TF, оцінка TFIDF та дисперсійна оцінка DE [3]. Ці методи дозволяють співставити окремим словам або словосполученням тексту деякі певним чином поставлені у відповідність числові вагові значення, що вказують на міру їх важливості в досліджуваному тексті [7]. Попередніми дослідженнями було визначено найбільш ефективним методом аналізу текстів метод дисперсійної оцінки, проте встановлено й фактори, які ускладнюють його застосування для вирішення задачі автоматизованого визначення семантичних термінів в навчальних матеріалах [8]. Зокрема, малий обсяг контенту й вузька семантична направленість елементів аналізу зменшують ефективність наведених методів аналізу текстів.

Суттєвою вадою існуючих методів та систем є необхідність використання баз даних корпусів слів відповідних мов для ідентифікації слів у текстах, що обмежує можливості таких систем та знижує гнучкість аналізу вузькоспеціалізованого контенту. Тому є доцільною розробка нової інформаційної технології, яка із використанням методу дисперсійної оцінки дозволить ефективно й автоматизовано визначити семантичні терміни в цифрових текстах.

Постановка задачі

Метою роботи є розробка інформаційної технології рекурсивного пошуку ключових термінів у цифрових текстах, яка проводить аналіз текстового контенту із використанням методу дисперсійної оцінки та без використання лексичних баз даних корпусів слів.

Викладення основних матеріалів дослідження

Характерною рисою запропонованої інформаційної технології є визначене використання рекурсивних складових при пошуку ключових термінів. Процес автоматизованого аналізу цифрового тексту шляхом рекурсивного пошуку ключових термінів із використанням методу дисперсійного оцінювання складається з ряду етапів перетворення інформації, які у сукупності формують інформаційну технологію рекурсивного пошуку ключових термінів, загальна схема якої показана на рис. 1.

Вхідними даними для обробки, відповідно до схеми інформаційної технології рекурсивного пошуку ключових термінів, є цифровий текст (файл документу з розширенням .docx) для аналізу та набір параметрів пошуку, до яких належать максимальна кількість слів у терміні n та гранична щільність ключових термінів у тексті P . По замовчуванню використовуються параметри $n = 5$ та $P = 15$ [9].

На *підготовчому етапі* (Блок 1) визначаються межі фраз, що обмежують локальні області пошуку окремих термінів. *Формування впорядкованої множини слів тексту* (Блок 1.1) полягає в аналізі структури цифрового документу. Шляхом витягу текстового контенту з цифрового документу формується впорядкована множина $M_{ТХТ}$, яка складається зі слів тексту в порядку їх слідування у документі. Кожному слову в множині привласнюється порядковий номер, за допомогою якого в подальшому відбувається пошук

відстаней між однаковими термінами. Оскільки термін може складатися з кількох слів, то в обрахунках його порядковим номером (позицією) приймається номер першого слова.



Рис. 1. Загальна схема інформаційної технології рекурсивного пошуку ключових термінів у цифрових текстах

Блок 1.2 (*Пошук меж текстових контейнерів*) призначений для розбиття текстового контенту електронного документу, що обробляється, на менші фрагменти – контейнери (фрази). Під фразою розуміється семантично цілісний вузол, який виокремлений стилістичним форматуванням тексту чи розділовими знаками, й локалізує місцезнаходження окремих термінів. Відтак, межами контейнеру визначаються:

- зміна стилістичних властивостей тексту;
- розділові знаки;
- абзаци/параграфи.

Результати проведеного аналізу властивостей ключових термінів [8] свідчать, що терміни не можуть виходити за межі таких контейнерів.

В процесі обробки власне розділові знаки (наприклад: !№%;%:*()*_+=-,.@#\$^&*<>""|V—... {}→«•§) видаляються з контенту елементів множини слів тексту $M_{ТХТ}$, за винятком випадків коли вони є частиною слів (зокрема, апострофи та дефіси).

Визначення приналежності слів до контейнерів (Блок 1.3) полягає в привласненні кожному елементу множини слів тексту $M_{ТХТ}$ окрім порядкового номеру слідування у документі ще й номеру контейнера, до якого воно віднесене. При подальшому аналізі до одного терміну не будуть входити елементи множини слів тексту з різними номерами контейнерів.

Рекурсивний етап (Блок 2), що забезпечує пошук множин термінів розмірності n , включає наступні етапи інформаційної технології рекурсивного пошуку ключових термінів, які реалізують рекурсивний пошук множин ключових термінів; при цьому проводиться по одній ітерації для кожного варіанту розмірності термінів. На початковій ітерації розмірність терміну x (кількість слів у терміні) приймається $x = 1$ й збільшується на одиницю кожен ітерацію до досягнення граничного значення n .

Формування початкової множини термінів в межах контейнерів (Блок 2.1) полягає у формуванні множини всіх можливих термінів розмірності x , які присутні в досліджуваному контенті. До множини можливих термінів M_T включаються всі знайдені неперервні впорядковані послідовності слів, які не

виходять за межі контейнерів.

Компактифікація множини варіантів термінів (Блок 2.2) виключає повтори термінів і дозволяє на основі множини можливих термінів M_{T0} сформувати множину оригінальних термінів M_{T1} , а також співставити кожному з них кількість появ у досліджуваному тексті.

Обрахунок відстаней між термінами в тексті (Блок 2.3) є підготовчим етапом до дисперсійного оцінювання термінів, за якого визначаються для кожного терміну з множини M_{T1} (з кількістю появ у тексті більше одного) всі відстані між сусідніми їх появами. При цьому за відстань береться різниця між меншим порядковим номером наступного терміну й більшим порядковим номером попереднього терміну у множині M_{THT} .

Визначення дисперсії для кожного терміну (Блок 2.4) полягає у визначенні дисперсійної оцінки для кожного з елементів множини оригінальних термінів M_{T1} за відстанями між термінами у тексті.

Дисперсійний аналіз є статистичним методом оцінки зв'язку між факторними й результативними ознаками в різних групах, відібраний випадковим чином, заснований на визначенні розходжень (розкиду) значень ознак. В основі дисперсійного аналізу лежить аналіз відхилень всіх одиниць досліджуваної сукупності від середнього арифметичного. Як міра відхилень береться дисперсія – середній квадрат відхилень. Відхилення, викликані впливом факторної ознаки (фактору) порівнюються з величиною відхилень, викликаних випадковими обставинами. Якщо відхилення, викликані факторною ознакою, більш істотні, ніж випадкові відхилення, то вважається, що фактор впливає на результуючу ознаку. В даній технології дисперсійна оцінка є оцінкою дискримінантної сили термінів й дозволяє відділити із загальної множини широковживаних у тексті термінів терміни, що розташовані рівномірно. Якщо деякий термін T в тексті, що складається з N слів, позначений як $T_k^n A_k^z$, де індекс k – номер появи даного терміну в тесті, а n – позиція даного слова в тексті, то інтервалом між послдовними появами терміну при таких позначеннях

буде величина $\Delta T_k^m = T_{k+1}^m - T_k^m = m - n$ $\Delta A_k = A_{k+1}^z - A_k^z = m - n$, де на m -й і n -й позиціях в досліджуваному тексті знаходиться термін T , який зустрівся $k+1$ -й і k -й рази. Тоді дисперсійна оцінка [9] розраховується за формулою $\sigma = \sqrt{(\Delta T^2) - (\Delta T)^2} / (\Delta T)$, де (ΔT) (ΔA) – середнє значення послдовності $\Delta T_1, \Delta T_2, \Delta T_k$ $\Delta A_1, \Delta A_2, \Delta A_k$; (ΔT^2) (ΔA^2) – послдовності T_1^2, T_2^2, T_k^2 A_1^z, A_2^z, A_k^z ; K – кількість появ терміну T в тексті.

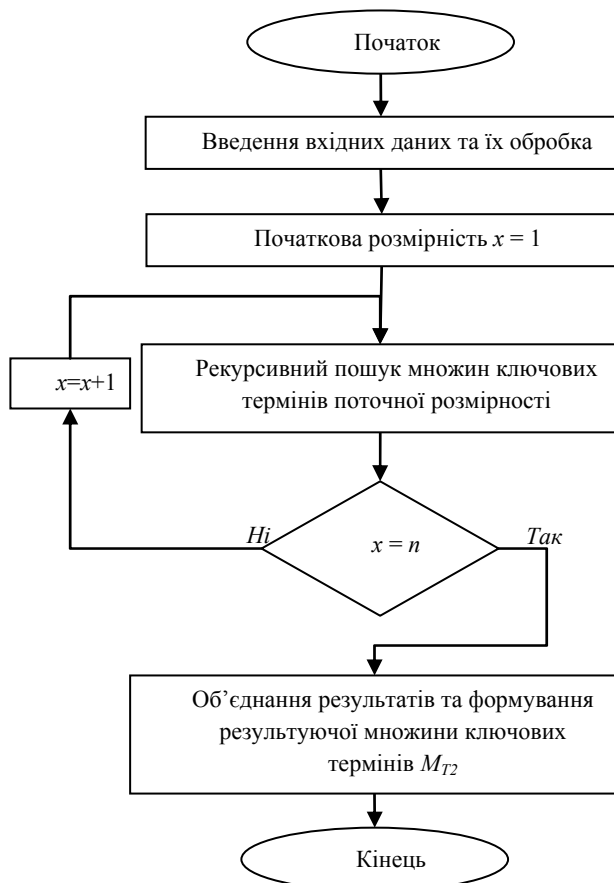


Рис. 2. Рекурсивна складова інформаційної технології

Сортування й обмеження множини термінів за дисперсією (Блок 2.5) визначає остаточний результат дисперсійного оцінювання елементів множини оригінальних термінів M_{T1} . Спершу проводиться сортування елементів множини оригінальних термінів M_{T1} за зменшенням їх дисперсійної оцінки, після чого проводиться видалення всіх елементів, дисперсійна оцінка яких рівна 0. Таке значення дисперсії вказує на те, що даний термін присутній у тексті лише один раз, й не може бути інтерпретований як ключовий. Результуюча множина термінів M_{T2} є результатом пошуку ключових термінів на поточній ітерації й формує локальні вихідні дані для фіксації результатів ітерації (Блок 2.6).

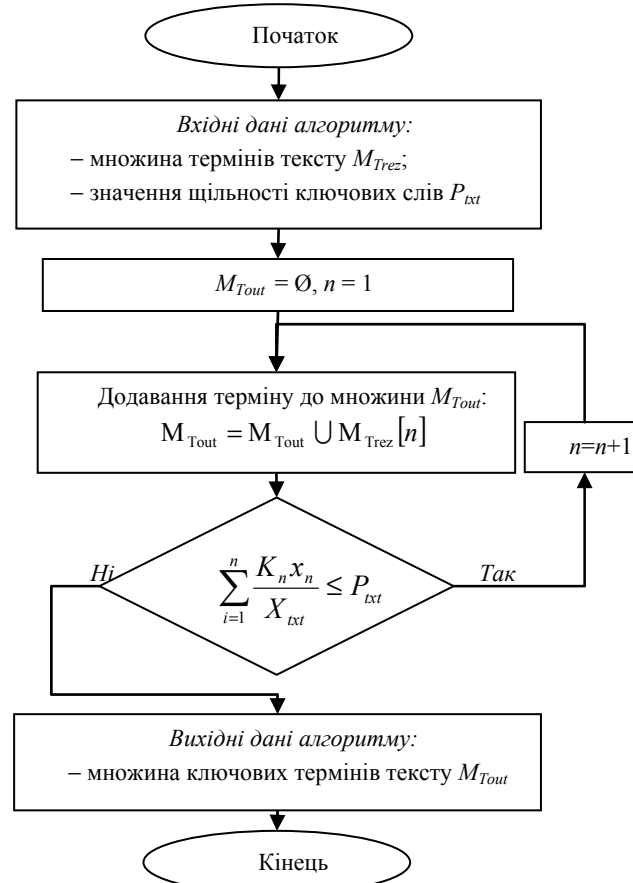


Рис. 3. Алгоритм формування множини ключових термінів тексту M_{Tout}

Перевірка умови рекурсії (Блок 2.7) здійснюється шляхом проведення перевірки, чи терміни всіх розмірностей були визначені протягом проведених ітерацій (рис. 2). Якщо умова $x = n$ справджується, то поточна ітерація визначається фінальною; якщо ж умова хибна ($x < n$), то виконується ще одна ітерація зі збільшенням розмірності термінів, що аналізуються ($x = x + 1$).

Завершальна ітерація (Блок 3) акумулює результати всіх ітерацій пошуку термінів та формує вихідні дані інформаційної технології. Так, об'єднання множин термінів різної розмірності (Блок 3.1) полягає в додаванні результуючих множин термінів M_{T2} кожної з ітерацій до загальної множини ключових термінів M_{Trez} . Одержана множина термінів M_{Trez} містить ключові терміни всіх розмірностей ($x \leq n$), у яких дисперсійна оцінка більша нуля.

На етапі сортування результуючої множини термінів (Блок 3.2) Елементи множини ключових термінів M_{Trez} сортуються за зменшенням їх дисперсійної оцінки, після чого їх кількість обмежується.

Обмеження результуючої множини термінів (Блок 3.3) є заключним етапом формування множини ключових термінів тексту. Кількість елементів в одержаній вихідній множині ключових термінів M_{Tout} визначається відповідно до показника граничної щільності ключових слів [8]. Щільність ключових слів P_{txt} є відношенням кількості слів ключових термінів в тексті до загальної кількості слів у тексті й для навчальних матеріалів становить 11–15% (рис. 3). Відповідно, до порожньої результуючої множини ключових термінів M_{Tout} додаються терміни з множини M_{Trez} з найбільшими значеннями оцінки важливості доти, доки справджується рівність:

$$\sum_{i=1}^n \frac{K_n x_n}{X_{txt}} \leq P_{txt}, \quad (1)$$

де K_n – кількість появ терміну n в множині M_{T1} ; x_n – кількість слів у терміні n ; X_{txt} – загальна кількість слів у тексті; n – поточна кількість термінів у множині M_{Tout} .

Вихідними даними інформаційної технології інформаційної технології рекурсивного пошуку

ключових термінів у цифрових текстах є множина ключових термінів тексту $M_{\text{Тов}}$, що в відповідній програмній системі може бути виведена користувачеві на екран або збережена у базі даних для подальшого використання.

Прикладна реалізація інформаційної технології

Розроблена інформаційна технологія рекурсивного пошуку ключових термінів у цифрових текстах була реалізована в тестовому програмному продукті. Вхідними даними для системи є електронний документ із цифровим текстом (рис. 4), а вихідними даними є множина ключових термінів, відповідна досліджуваному фрагменту текстового контенту електронного документу (рис. 5). Для написання програмного продукту на платформі .NET було використано мову програмування C# та розширення Spire.Doc.dll для аналізу рівнів структури документу Heading та доступу до елементів контенту TextRange, який є найнижчим рівнем структури документу та визначає фрагменти тексту однакового стилю [10].

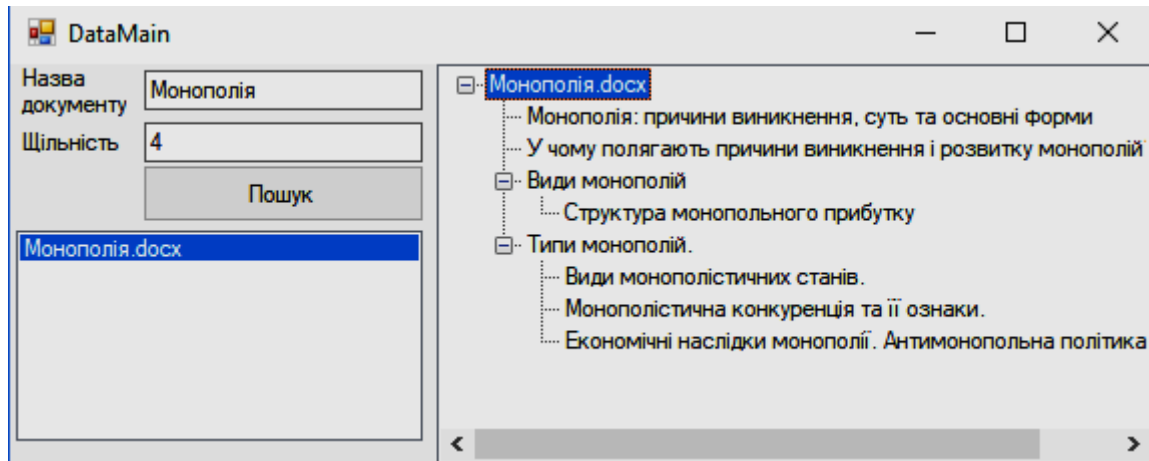


Рис. 4. Форма вибору тексту для аналізу в тестовому програмному продукті

№	Термини	ДО	Кількість в розділі
0	капіталу	1,70698654098086	14
1	товарів	1,54268695191629	6
2	монополій	1,45758389717667	15
3	конкуренція	1,41580159202711	8
4	ціни	1,39343668715595	24

Рис. 5. Форма відображення вихідних даних у тестовому програмному продукті

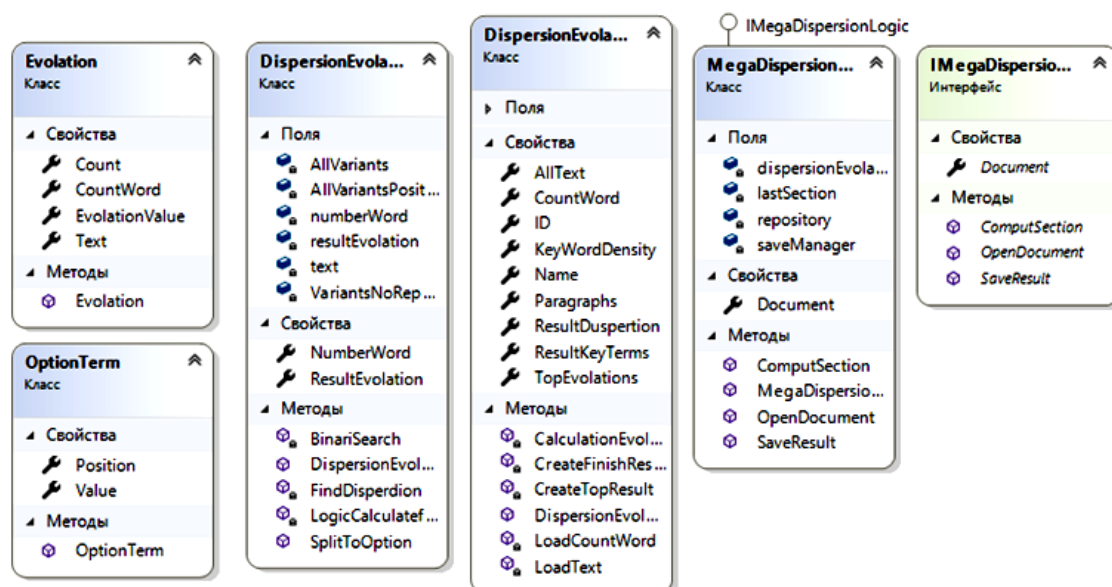


Рис. 6. Діаграма класів модулю розрахунків тестового програмного продукту

Структуру програмного продукту, що відповідає безпосередньо за рекурсивний пошук ключових

термінів у цифрових текстах, у вигляді діаграми класів модулю розрахунків відображено на рисунку 6. Відповідно до діаграми, клас OptionTerm використовується в процесі розрахунку для збереження проміжних даних про терміни-кандидати, а саме значення терміну та його позиції в тексті, що аналізується. Клас Evolution призначений для збереження даних про ключові терміни, зокрема кількість появ терміну в тексті, кількість слів в терміні, вагу терміну і символічне значення терміну. Клас DispersionEvolution реалізує пошук та оцінку ключових термінів, які складаються з x слів. Головним методом, який проводить оцінку термінів, є «FindDisperdion», який повертає перелік із ключових термінів з оціночними даними класу типу Evolution.

Клас «DispersionEvolutionOfSection» є основним в розрахунку ключових термінів. Його робота базується на результаті попереднього класу, оскільки попередній лише проводить оцінку термінів. Даний клас групує його результати, чим формує перелік з найвищими результатами незалежно від кількості слів в терміні, що реалізовано в методі «CreateTopResult». Також в класі у методі «CreateFinishResult» реалізовано обрахунок кінцевого результату з урахуванням щільності ключових термінів, яку задає користувач. Решта методів є другорядними щодо мети дослідження й відповідають за роботу з документами .docx, взаємодію користувача з програмою або візуалізацію результатів роботи системи. Кінцевим результатом роботи тестового програмного продукту є множина ключових термінів тексту. Таким чином, в тестовому програмному продукті реалізовано етапи обробки даних відповідно до інформаційної технології рекурсивного пошуку ключових термінів у цифрових текстах.

Дослідження ефективності інформаційної технології

Ефективність практичного застосування запропонованої інформаційної технології було визначено шляхом використання наведеного тестового програмного продукту за показниками точності (Precision) та повноти (Recall) [11]. Точність пошуку P – це відношення кількості релевантних ключових термінів, знайдених автоматично, до загальної кількості знайдених ключових термінів у досліджуваному тексті. Повнота пошуку R – це відношення кількості релевантних ключових термінів, знайдених автоматично, до загальної кількості релевантних ключових термінів у досліджуваному тексті.

Точність пошуку P і повнота пошуку R обчислюються наступним чином:

$$P = \frac{|M_{TK}^E \cap M_{TK}|}{|M_{TK}|}, R = \frac{|M_{TK}^E \cap M_{TK}|}{|M_{TK}^E|}, \quad (2)$$

де M_{TK}^E – множина релевантних ключових термінів, сформована експертом; M_{TK} – множина знайдених автоматично ключових термінів.

З метою визначення ефективності практичного застосування розробленої інформаційної технології, тестовим програмним продуктом було оброблено тестову вибірку з 40 файлів, що містили досліджуваний текстовий контент.

Отримані множини ключових термінів порівнювалися з множинами ключових термінів, сформованих авторами текстів, шляхом обрахунку показників точності пошуку P та повноти пошуку R . За результатами обрахунку було одержано відповідно дві множини по 40 показників кожна, з використанням яких було обчислено показники середньої точності пошуку \bar{P} та середньої повноти пошуку \bar{R} за наступними формулами:

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^k P_k}{k}, \bar{R} = \frac{\sum_{i=1}^k R_k}{k}, \quad (3)$$

де k – кількість текстів у тестовій вибірці.

Середня точність пошуку склала 0,705, а повнота пошуку склала 0,512. Мінімальна точність пошуку склала 0,385, мінімальна повнота пошуку – 0,458; максимальна точність пошуку – 0,896, максимальна повнота пошуку – 0,933 (рис. 7).

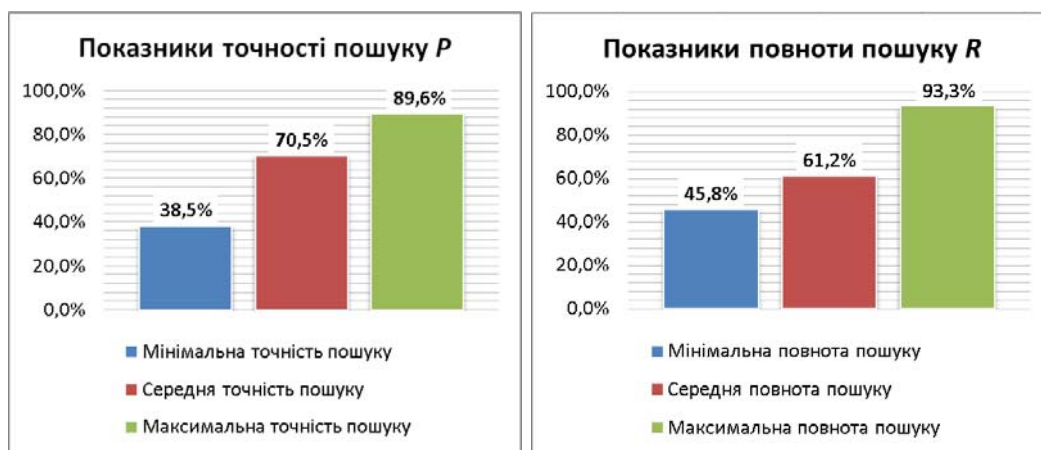


Рис. 7. Результати дослідження ефективності інформаційної технології (точність та повнота пошуку)

Оскільки в задачах розробки даної інформаційної технології було відзначено відсутність необхідності використання лексичних баз даних корпусів слів для ідентифікації слів у текстах, було порівняно одержані результати дослідження ефективності з відповідними результатами, одержаними при використанні подібної інформаційної технології [8], яка використовує лексичну базу даних корпусу слів української мови для ідентифікації слів. Для аналізу використовувались тотожні вибірки файлів із текстовим контентом. Результати порівняння надано на рис. 8.

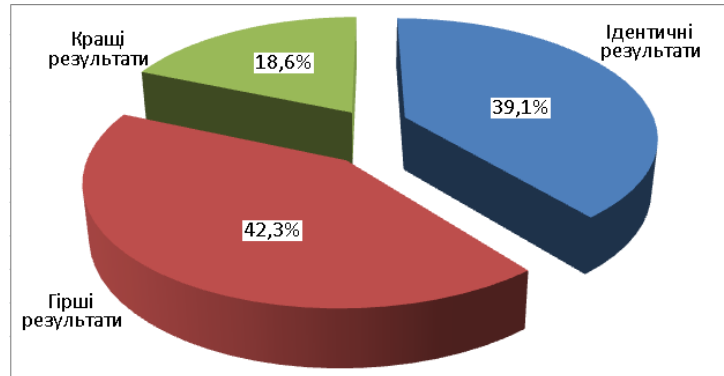


Рис. 8. Результати порівняння ефективності інформаційної технології

Таким чином, результати порівняння ефективності інформаційної технології рекурсивного пошуку ключових термінів у цифрових текстах визначено неоднозначні, уникнення використання лексичних баз даних корпусів слів для ідентифікації слів у текстах у 42,3% випадках негативно вплинуло на якість результату пошуку, проте в 18,6% випадків такий підхід виявив навіть кращий результат.

Дискусія

Перевагами розробленої інформаційної технології рекурсивного пошуку ключових термінів у цифрових текстах, яка проводить аналіз текстового контенту із використанням методу дисперсійної оцінки, є:

- 1) відсутність необхідності використання лексичних баз даних корпусів слів;
- 2) суттєве прискорення швидкодії (як наслідок п.1);
- 3) можливість використання для текстів на різних мовах;
- 4) можливість використання для текстів із кількома мовами;
- 5) кращі результати при обробці вузькоспеціалізованого контенту.

У зв'язку з предметною областю, що містить неоднозначні та важко формалізовані сутності, відзначено наступні фактори, що ускладнюють процес оцінки ефективності інформаційної технології:

- 1) деякі семантично важливі терміни тексту автори суб'єктивно ігнорують;
- 2) деякі терміни автори включають до переліку ключових, хоча вони розглядаються мінімально;
- 3) на деяких термінах автори акцентують надмірну увагу попри їх семантичну другорядність в тексті.

Тому відсутність програмно визначених термінів у множині автора не завжди характеризує недолік розглядуваної технології, як і результати порівняння з іншими методами пошуку ключових термінів.

Зважаючи на переваги, розроблена інформаційної технології рекурсивного пошуку ключових термінів у цифрових текстах найбільш ефективно може бути використана для аналізу текстів із невідомими властивостями тематики й мови.

Висновки

В статті розглянуто інформаційну технологію рекурсивного пошуку ключових термінів у цифрових текстах, яка проводить аналіз текстового контенту із використанням методу дисперсійної оцінки та без використання лексичних баз даних корпусів слів. Дана інформаційна технологія може бути ефективно використана для аналізу текстів із невідомими властивостями тематики та мови.

Розроблене відповідно до інформаційної технології рекурсивного пошуку ключових термінів програмне забезпечення в результаті обробки вхідних даних у вигляді цифрового документу формату .docx із текстовим контентом дозволяє одержувати вихідні дані у вигляді відповідної тексту множини ключових термінів.

Проведені за допомогою розробленого відповідно до інформаційної технології тестового програмного забезпечення дослідження підтвердили можливість ефективно автоматизовано формувати множини ключових семантичних термінів текстів із показниками точності пошуку до 89,6% й повноти пошуку до 93,3%.

Подальші дослідження спрямовані на більш детальне дослідження ефективності інформаційної технології й розгорнутий аналіз результатів із метою визначення причин зниження ефективності, а також пошуку областей застосування інформаційної технології для випадків, що характеризуються високими показниками ефективності її застосування.

Література

1. Мазурець О. В. Онтологічний підхід до побудови семантичної моделі навчальних матеріалів / О. В. Мазурець // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. – 2017. – № 6. – С. 223–229.
2. Сергієва О. О. Інтелектуальна система автоматизованого стиснення текстів / О. О. Сергієва, О. В. Мазурець // Матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні управляючі системи та технології ICST-ODESSA-2017». – Одеса, 2017. – С. 283–285.
3. Бармак О. В. Методи автоматизації визначення семантичних термінів у навчальних матеріалах / О. В. Бармак, О. В. Мазурець // Вісник Хмельницького національного університету. Сер.: Технічні науки. – 2015. – № 2(223). – С. 209–213.
4. SEO-аналізатор «Адвего» [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://advego.ru/text/seo/>.
5. SEO-платформа «Serpstat» [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://serpstat.com/>
6. Семантичний онлайн-аналізатор тексту «Seozor» [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://seozor.ru/tools/analyzer.php>.
7. Ventura J. New Techniques for Relevant Word Ranking and Extraction / J. Ventura, J. Silva // Proceedings of the artificial intelligence 13th Portuguese conference on Progress in artificial intelligence, EPIA'07. – Berlin: Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2007. – P. 691–702.
8. Krak Y. The practice implementation of the information technology for automated definition of semantic terms sets in the content of educational materials / Y. Krak, O. Barmak, O. Mazurets // CEUR Workshop Proceedings, 2139. – 2018. – P. 245–254.
9. Ландэ Д. В. Компактифицированный горизонтальный граф видимости для сети слов / Д. В. Ландэ, А. А. Снарский // Труды Международной научной конференции «Интеллектуальный анализ информации ИАИ-2013. Знания и рассуждения» / КПИ. – Киев, 2013. – С. 158–164.
10. Мазурець О. В. Використання спеціалізованих програмних розширень для автоматизації роботи з цифровими документами навчальних матеріалів / О. В. Мазурець, О. В. Ковальчук, В. О. Слободзян // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. – 2018. – № 1. – С. 61–69.
11. Manning C. Introduction to Information Retrieval / C. Manning, P. Raghavan, H. Schutze – Cambridge University Press, 2008. – 482 p.

References

1. MAZURETS, O. V. (2017) Ontological Approach to Building a Semantic Model of Educational Materials. Herald of Khmelnytskyi national university. Technical Sciences, Issue 6, 2017 (255). p. 223-229.
2. SERHIEVA, O. O. & MAZURETS, A. V. (2017) Intelligent System of Automated Texts Compression // Collection of scientific works on the materials of the VIth international scientific and practical conference “ICST-ODESSA-2017”. p. 223-229.
3. BARMAK, O. V. & MAZURETS, O. V. (2015) Methods of Automation of Definition of Semantic Terms in Educational Materials // Herald of Khmelnytskyi national university. Technical Sciences, Issue 2, 2015 (223). p. 209-213.
4. ADVEGO (2019) SEO-analyzer “Advego”. [Online] Available from: <http://advego.ru/text/seo/> [Accessed: 25 February 2019]
5. SERPSTAT (2019) SEO-analyzer “Serpstat”. [Online] Available from: <http://seozor.ru/tools/analyzer.php> [Accessed: 25 February 2019]
6. SEOZOR (2019) Semantic online-analyzer of texts “Seozor”. [Online] Available from: <http://seozor.ru/tools/analyzer.php> [Accessed: 25 February 2019]
7. VENTURA, J. & SILVA, J. (2007). New Techniques for Relevant Word Ranking and Extraction. In Proceedings of 13th Portuguese Conference on Artificial Intelligence, Springer-Verlag, p. 691-702.
8. KRAK, Y., BARMAK, O. & MAZURETS, O. (2018) The Practice Implementation of the Information Technology for Automated Definition of Semantic Terms Sets in Content of Educational Materials. CEUR Workshop Proceedings, 2139. p. 245-254.
9. LANDE, D. V. & SNARSKIY, A. A. (2013) Kompaktificirovanniy Gorizontalnyy Graf Vidimosti dlya Seti Slov / D.V. Lande, A. A. Snarskiy // Trudi Mejdunarodnoy Nauchnoy Konferencii «Intellektualnyy Analiz Informacii IAI-2013. Znanija I Rassujdenija». p 158-164.
10. MAZURETS, O. V., KOVALCHYK, O. V. & SLOBODZIAN, V. O. (2018) Using specialized software packages for automation of work with digital documents of educational materials // Herald of Khmelnytskyi national university. Technical Sciences, Issue 1, 2018 (257). p. 61-69.
11. MANNING, C., RAGHAVAN, P. & SCHUTZE, H. (2008) Introduction to Information Retrieval. Cambridge University Press.

Рецензія/Peer review : 23.3.2019 р.

Надрукована/Printed : 2.6.2019 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Сорокатиї Р. В.

ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ ТА МЕТОД МОНІТОРИНГУ СТАНІВ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ МАЛИХ ГІДРОСТАНЦІЙ НА ОСНОВІ ОБРАЗНО-КЛАСТЕРНОЇ МОДЕЛІ

У статті розглянуто синтез структури моделі інтерактивного моніторингу квазістаціонарних станів технологічного обладнання малих гідроелектростанцій на основі образно-кластерної моделі. Основною метою даної роботи є розробка теорії та методології побудови образно-кластерних моделей моніторингу станів малих гідроелектростанцій, яка включає розробку теоретичних основ побудови комплексу моделей квазістаціонарних станів багатопараметричних технологічних об'єктів, аналіз структури та характеристик інформаційних потоків, які формуються на гідроелектростанції для моніторингу їх станів. Важливим елементом інформаційної взаємодії компонентів у складі технологічного обладнання гідроелектростанцій є інтерактивний режим реалізації моніторингу, ефективна структуризація моделей об'єктів управління, а також надійне розпізнавання квазістаціонарних, нештатних, перед аварійних, аварійних та екологічно-небезпечних ситуацій на об'єктах електроенергетики. Застосування глибокого статистичного, кореляційного, ентропійного та логіко-статистичного аналізу станів об'єктів є перспективним інструментом підвищення ефективності роботи операторів в умовах виникнення нештатних ситуацій для підвищення ефективності аварійної та екологічної безпеки складних промислових об'єктів. Побудова образно-кластерної моделі проводиться з використанням алгоритму розпаралеленого опрацювання статистичних даних та кореляційних характеристик технологічних об'єктів. Викладені теоретичні засади методології побудови образно-кластерної моделі багатопараметричних об'єктів на основі запропонованого функціоналу оцінки стану об'єкту моніторингу. Проаналізовані структурні рішення комп'ютеризованих систем контролю параметрів технологічного процесу. Систематизовані функції інтерактивної взаємодії оператора з об'єктом в інформаційному середовищі комп'ютеризованої системи. Представлена структура розпаралеленого алгоритму побудови та відображення образно-кластерної моделі об'єкта на основі розробленого програмного забезпечення САПР.

Ключові слова: образно-кластерна модель, інтерактивний моніторинг, технологічне обладнання малих гідро-електростанцій, алгоритм розпаралеленого опрацювання статистичних даних, кореляційні характеристики технологічних об'єктів, комп'ютеризовані системи контролю параметрів технологічного процесу.

NATALIIA VOZNA, IHOR.PITUKH
Ternopil National Economic University

THEORETIC PRINCIPLES AND METHODS FOR MONITORING STATES OF TECHNOLOGIC EQUIPMENT OF SMALL HYDROSTATIONS BASED ON IMAGE CLUSTER MODEL

Abstract - The article deals with the synthesis of the interactive monitoring model structure of technological equipment quasi-stationary states in small hydropower plants based on the image cluster model. The main purpose of this work is to develop the theory and methodology of constructing image cluster model for monitoring the states of small hydropower plants, which includes the development of theoretical foundations for the construction of a set of models of quasi-stationary states of multi-parameter technological facilities, analysis of the structure and characteristics of information flows that are formed in hydropower plants for monitoring their states. Interactive mode of monitoring implementation, effective structuring of control facilities models, as well as reliable identification of quasi-stationary, abnormal, pre-emergency, emergency and environmentally hazardous situations at power plants are important for information interaction of technological equipment components of hydropower plants. The application of deep statistical, correlation, entropy, and logical-statistical analysis of the facility states is a promising tool for increasing the operators' efficiency in conditions of abnormal situations as it leads to increasing the effectiveness of emergency preparedness and environmental safety of complex industrial facilities. The construction of image cluster model is carried out using the algorithm for parallel processing of statistical data and correlation characteristics of technological objects. The theoretical principles of the methodology of constructing image cluster model of multi-parameter objects based on the proposed functional for the assessment of the monitoring object state are described. Structural solutions of computerized control systems of technological process parameters are analyzed. Functions of interaction between the operator and the object in the information environment of the computerized system are systematized. The structure of a parallel algorithm for constructing and displaying image cluster object model on the basis of the developed CAD software is presented.

Keywords: image-cluster model, interactive monitoring, technologic equipment of small hydrostations, algorithm of parallel processing of statistic data, correlation characteristics of technologic objects, computerized control system parameters of the technologic process.

Постановка проблеми. Перспективним напрямком розвитку відновлювальної енергетики є створення МГЕС на річках. В Україні існує значний ресурс на річках Прикарпаття, Дністровського каньйону, Закарпаття, Полісся, Кіровоградщини, Вінничини зі значними перепадами висот, що створює потенційні умови розвитку цієї енергетики. Прикладом успішного вирішення цієї проблеми є побудова гідроелектростанцій на річках Стрипа, Золота Липа, Уж, Південний Буг.

Комп'ютеризована система моніторингу контролює понад 170 параметрів гідроелектростанції, яка повинна надійно працювати в умовах динамічної зміни вхідних параметрів, включаючи: рівень води у верхньому б'єфі; кут відкривання направляючого апарату; частоту обертів турбіни; температуру турбіни; спектр коливань турбіни; струм генератора; енергетичні параметри генератора; перекося струму по фазах;

температуру генератора; блокування та захисти. При цьому оператор який оснащений пультом (мнемосхемою) не може швидко реагувати на «передаварійні» і «аварійні» стани на гідроелектростанціях. Особливо це необхідно враховувати, коли ряд параметрів пов'язані між собою кореляційними та спектральними характеристиками, які оператор не може логічно опрацювати в заданий момент часу. Тому ІС, яка виконує функції моніторингу технологічного обладнання МГЕС, повинна виконувати більш глибоке опрацювання параметрів та формування інтегральних результатів для оператора на основі сукупності статистичних, кореляційних, спектральних, логіко-статистичних, інформаційних, кластерних та емпіричних моделей.

Таким чином, розробка ефективної ІС опрацювання та відображення станів технологічного обладнання «норма», «розвиток аварії» та «аварія» є актуальною задачею контролю параметрів технологічного процесу

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Важливою проблемою надійної експлуатації промислового обладнання МГЕС є їх оснащення сучасними інформаційними системами (ІС) високого рівня. Прикладами таких систем є інтегровані розподілені комп'ютеризовані системи [1-6]. Програмно-апаратні засоби такого класу інформаційних систем тиражуються і впроваджуються відомими зарубіжними фірмами: ABB, Motorola, F&F, SPM, SCHENCK, YOKOGAWA та їх представництвами в Україні (Електросвіт, ТОВ «Йокогава електрик Україна») [4–6].

В той же час, незважаючи на високий рівень таких ІС, будуються вони на базі універсальних контролерів, які характеризуються широкою універсальністю і при цьому не забезпечують високу надійність.

Представлення інформаційних даних про стан технологічного обладнання таких станцій відображено на мнемосхемах пультів оператора [7–10]. Враховуючи, що людина-оператор виконує функції моніторингу та управління технологічним процесом, вона ж і несе відповідальність за результати діагностування в цілому [10, 11]. Тому структуризація даних в інтерактивній технології взаємодії "оператор-моніторингова система" суттєво впливає на ефективність роботи об'єктів.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо теоретичні засади способу контролю параметрів технологічного процесу управління. Відомий спосіб контролю параметрів технологічного процесу наведено в описі промислової системи 800xA [4].

Суть такого способу полягає у вимірі фізичних параметрів об'єкта, розрахунку їх статистичних характеристик та відображенні станів технологічного процесу у вигляді: таблиці усіх або за вибором оператора певної групи виміряних та розрахованих технологічних параметрів; трендів графіків реєстрації виміряних параметрів та розрахованих статистичних характеристик станів технологічного процесу у часі; реалістичного структуризованого представлення об'єкта чи технологічного процесу на моніторі оператора.

Недоліком такого способу є звужені функціональні можливості та низька інформативність, оскільки відображення окремих технологічних та віртуальних розрахункових параметрів здійснюється не інтегровано на екрані монітора оператора і не дозволяє здійснювати структуризовану ідентифікацію стану технологічного процесу та об'єкта контролю. При певній складності об'єкта контролю і великому числі контрольованих та розрахункових технологічних параметрів спостерігається низька ефективність та можливість появи великого числа помилок дій оператора при ідентифікації станів технологічного процесу «норма», «прогноз аварії» та «аварія».

Відомий також спосіб контролю параметрів технологічного об'єкту реалізовано у пристрої контролю роботи технологічного об'єкту [12]. Його суть полягає у тому, що стани технологічного об'єкта «норма», «прогноз аварії» та «аварія» розраховуються на основі виміряних параметрів та обчисленої кластерної моделі і кожен з цих станів відображається на окремому індикаторі.

Недоліком такого способу є звужені функціональні можливості та низька інформативність, оскільки результатом аналізу технологічного процесу є контроль відхилення від норми тільки ймовірнісних переходів кластерної моделі без врахування його виміряних та розрахованих статистичних характеристик. Також недоліком є контроль параметрів технологічного процесу шляхом відображення його станів «норма», «прогноз аварії» та «аварія» на багатьох окремих індикаторах, які здійснюють тільки реєстрацію факту відхилення від норми і не дозволяють інтегровано ідентифікувати ці стани у вигляді структуризованої образно-кластерної фейс-моделі.

Найбільш подібним до способу контролю параметрів технологічного процесу є спосіб розглянутий у патенті [13]. Такий спосіб контролю параметрів технологічного процесу включає циклічний вимір значень кожного параметра і їхнє запам'ятовування, визначення стану технологічного процесу шляхом порівняння вимірюваних значень параметра в області можливих значень норми, ідентифікацію стану квазістаціонарного об'єкта, визначення структурної автокореляційної функції та нормованого коефіцієнта взаємкореляції, за якими порівнюють:

- ковзані статичні характеристики математичного сподівання, з виразами:

$$L_1 = \begin{cases} 0, a_1 < M_j < a_2 \\ 1, a_1 \geq M_j \geq a_2 \end{cases},$$

$$\text{де } M_j = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1+j}^{i=n+j} x_{i+j}, \quad i = 1, 2, \dots, I,$$

n – число контрольованих параметрів технологічного об'єкта;

j – дискретний зсув у часі;

- структурну кореляційну функцію, згідно з виразом:

$$L_2 = \begin{cases} 0, b_1 < C_{xx}(j) < b_2 \\ 1, b_1 \geq C_{xx}(j) \geq b_2 \end{cases},$$

$$\text{де } C_{xx}(j) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - x_{i-j})^2, \quad j = \overline{0, m};$$

- коефіцієнти нормованої взаємодії між двома параметрами, згідно з виразом:

$$L_3 = \begin{cases} 0, 0 < p_{xy} < 1 \\ 1, 0 \geq p_{xy} \geq -1 \end{cases}$$

$$\text{де } p_{xy} = \frac{R_{xy}(0)}{\sigma_x \cdot \sigma_y}, \quad \sigma_x = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1+j}^{i=n+1} (x_i - M_{xj})^2, \quad \sigma_y = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1+j}^{i=n+1} (y_i - M_{yj})^2.$$

Таким чином згідно з приведеною сукупністю вимірних та визначених параметрів технологічного процесу в даному способі виконується така послідовність операцій;

$$X_{ТП} = F(\{x_i\}, \{y_i\}, S, M_j, M_{xj}, \sigma_x, \sigma_y, C_{xx}(j), R_{xy}(0), p_{xy}, L_1, L_2, L_3)$$

де **Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования., Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.** – вимірювання параметрів технологічного процесу; **Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.** – ідентифікація квазістаціонарного стану технологічного процесу; **Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования., Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования., Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.** – визначення ковзних статистичних характеристик математичного сподівання; **Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования., Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.** – визначення середньоквадратичних оцінок дисперсії; **Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.** – визначення структурної кореляційної функції **Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.** – визначення центрованої взаємкореляційної функції в нульовій точці між параметрами **Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования., Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования., Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.** – визначення коефіцієнта нормованої взаємкореляції між кожною парою параметрів, на основі яких визначаються **Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования., Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования., Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.** – логіко-статистичні оцінки порівняння вимірюваних значень параметрів в області можливих значень норми, відповідно по амплітуді **Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования., по динаміці Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.** та фазі **Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.**

Недоліком даного способу є звужені функціональні можливості, які обумовлені тим, що контроль параметрів технологічного процесу не здійснюється шляхом визначення вибірових зважених ковзних математичних сподівань параметрів технологічного процесу, порівнянь спектральних характеристик вимірювальних значень параметрів технологічного процесу області можливих значень норми, визначення матриці ймовірностей переходу технологічне процесу з одного стану в інший, визначення оцінки кореляційної ентропії технологічне процесу, формування еталонного зображення образно-кластерної моделі стану технологічного процесу «норма», порівняння параметрів еталонного стану з вимірними, спостережуваними розрахованими параметрами технологічного процесу «норма», «прогноз аварії» та «аварія» ідентифікацію стану технологічного процесу відображення на моніторі оператора у вигляді образно-кластерної моделі, що знижує інформативність ідентифікації стану технологічного процесу.

Запропонований спосіб контролю параметрів технологічного процесу, що включає удосконалення способу контролю параметрів технологічного процесу шляхом розширення функціональних можливостей та збільшення його інформативності [13], включає циклічний вимір значень кожного параметра і їх запам'ятовування, визначення стану технологічного процесу шляхом порівняння вимірюваних значень параметра з граничними уставками, ідентифікацію стану квазістаціонарного об'єкта, визначення структурної автокореляційної функції та нормованого коефіцієнта взаємкореляції, за якими порівнюють ковзні статистичні характеристики математичного сподівання, в якому

- визначають вибіркові математичні сподівання, згідно з виразами:

Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования. – вагова функція, що визначає інформативність виміряного значення технологічного процесу з нульовим ефектом старіння інформації, що дозволяє прогнозувати тенденції та майбутні стани технологічного процесу;

- визначають зважені ковзні математичні сподівання параметрів, згідно з виразами:

$$M_{vx} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1+j}^{i=n+j} V_{i-j} X_{i+j}, M_{vy} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1+j}^{i=n+j} V_{i-j} Y_{i+j},$$

які дозволяють виконувати екстраполяцію та передбачення зміни станів технологічного процесу в часі, де **Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.** – вагова функція, що визначає інформативність виміряного значення технологічного процесу з нульовим ефектом старіння інформації, що дозволяє прогнозувати тенденції та майбутні стани технологічного процесу;

- виконують порівняння спектральних характеристик вимірюваних значень параметрів в області можливих значень норми, згідно з виразами:

Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.

де **Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.**,

Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования. – кругова частота косинусного перетворення Фур'є,

Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования. – нормована і центрована автокореляційна функція контрольованого параметра технологічного процесу, **Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.**– дисперсія технологічного процесу,

Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.– центрована автокореляційна функція параметра технологічного процесу, **Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.** ;

- визначають матрицю ймовірностей переходу технологічного процесу з одного стану в інший

Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.,

Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.,

де P_{11} – ймовірний стан норми, P_{1n} – ймовірний стан прогнозу різних видів передаварійних станів, P_{ij} – ймовірнісний стан аварії, $i = \overline{1, m}$, $j = \overline{1, n}$;

- здійснюють оцінку кореляційної ентропії технологічного процесу, яка відображає деградацію кореляційних характеристик технологічного процесу і передбачає розвиток передаварійних станів технологічного процесу, згідно з виразом:

$$I_x = n \cdot \widehat{E} \left[\left[\frac{1}{2} \log_2 \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (D_x^2 - R_{xx}^2(j)) \right] \right],$$

де m – число точок автокореляційної функції, $\widehat{E}[\bullet]$ – цілочисельна функція з округленням до більшого цілого [9, 10];

- формують еталонне зображення образно-кластерної моделі стану технологічного процесу «норма», додатково порівнюють параметри еталонного стану з вимірними, спостережуваними та розрахованими параметрами технологічного процесу «норма», «прогноз аварії» та «аварія» та ідентифікують стан технологічного процесу додатковим відображенням на моніторі оператора структуризованої образно-кластерної фейс-моделі.

Згідно з визначенням введених нових параметрів технологічного процесу, удосконалений контроль параметрів технологічного процесу з можливістю передбачення розвитку передаварійних та аварійних станів технологічного процесу, запропонований спосіб здійснюється згідно з наступною послідовністю операцій:

$$X_{\dot{O}I} = (\{x_i\}, \{y_i\}, S, M_j, M_{xj}, M_{yj}, \sigma_x, \sigma_y, C_{xx}(0), \rho_{xy}, L_1, L_2, L_3, M_x, M_y, M_{vx}, M_{vy}, L_4, P_{ij}, I_x)$$

де $L_1, L_2, L_3, M_x, M_y, M_{vx}, M_{vy}, L_4, P_{ij}, I_x$ – визначаються нові параметри технологічного процесу, які дозволяють збільшити функціональні можливості й інформативність способу контролю параметрів технологічного процесу та формування еталонного зображення образно-кластерної моделі стану технологічного процесу «норма», порівняння параметрів еталонного стану з вимірними, спостережуваними та розрахованими параметрами технологічного процесу «норма», «прогноз аварії» та «аварія», ідентифікацію стану технологічного процесу відображенням на моніторі оператора образно-кластерної моделі, що дозволяє додатково підвищити швидкодію реакції оператора на відхилення технологічного процесу від норми та попередити виникнення його аварійних станів.

Реалізація образно-кластерної моделі моніторингу та ідентифікації станів технологічного

обладнання МГЕС на основі ОКМ для різних станів технологічного процесу, у порівнянні з еталонним, показано в табл. 1.

Таблиця 1

Систематизація технологічних параметрів, які підлягають контролю

Стан технологічного процесу	Параметри технологічного процесу									
	$\{x_i\}$	$\{y_i\}$	S	M_j	M_{xj}	M_{yj}	σ_x	σ_y	$C_{xx}(j)$	$R_{xy}(0)$
Еталон	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Норма	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Прогноз аварії	+	+	+	+	-	-	+	+	+	+
Аварія	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-

Стан технологічного процесу	Параметри технологічного процесу										
	P_{xy}	L_1	L_2	L_3	M_x	M_y	M_{vx}	M_{vy}	L_4	P_{ij}	I_x
Еталон	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Норма	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Прогноз аварії	+	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+
Аварія	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Система контролю, що реалізує запропонований спосіб параметрів технологічного процесу, зображена на рис. 1.

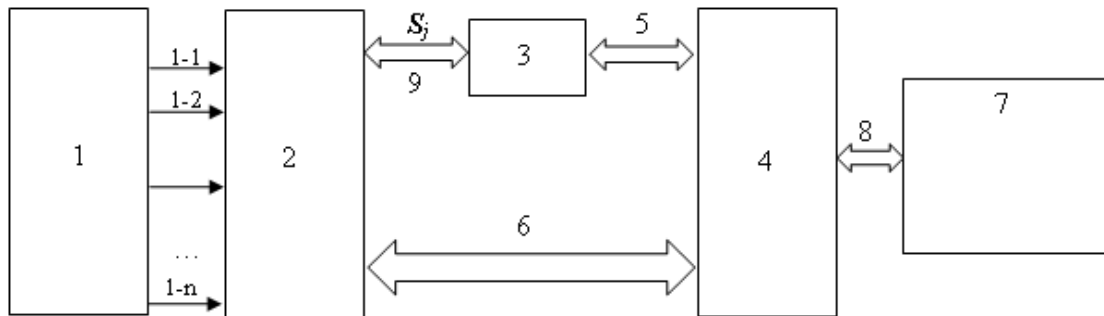


Рис. 1. Система контролю параметрів технологічного процесу

Визначені параметри блоку 7 (рис. 1) розраховуються на основі еталонних моделей технологічного процесу таблиці 1.

Система контролю, що реалізує запропонований спосіб (рисунок 1), включає датчики вимірів параметрів 1, 1-2, ... 1-n, блок збору інформації 2, до інформаційного входу якого підключені датчики 1-1, 1-2, ... 1-n, пульт оператора 3, пристрій підготовки інформації 4, першу шину 5, що з'єднує пристрій підготовки інформації 4 і пульт оператора 3, другу шину 6, що з'єднує пристрій підготовки інформації 4 і блок збору інформації 2, блок введення інформації 1, третю шину 8, що з'єднує блок виведення інформації 7, який додатково відображає на моніторі оператора образно-кластерну модель і пристрій підготовки інформації 4, шину 9, що з'єднує пульт оператора 3 і блок збору інформації 2.

Пристрій підготовки інформації 4 являє собою програмний контролер, що реалізує паралельне опитування датчиків і перетворення кодів вихідних величин датчиків, отриманих від блока збору інформації 2 у значення відповідних параметрів. На виході блока збору інформації 2 за допомогою шини 6 в пристрій підготовки інформації надходить набір кодів ансамблю параметрів, які визначаються кодом стану керування S_j , що надходять з пульта оператора 3 шиною 9 в блок збору інформації 2. Необхідність паралельного формування кодів параметрів об'єкта, які надходять у пристрій підготовки інформації 4 обумовлено необхідністю виключення ефектів старіння інформації, які можуть виникати при організації циклічного опитування датчиків і негативно впливають на розрахунок структурної кореляційної функції та коефіцієнтів нормованої взаємкореляції [12].

Приклад позиціонування та динаміки змін вказано на рис. 2. В якості атрибутів образно-кластерної моделі в станах об'єкта «норма», «розвиток аварії» та «аварія» представлено на рисунку 2, де 1 – рівень води у верхньому б'єфі; 2 – частота обертів турбіни; 3 – температура турбіни; 4 – енергетичні параметри генератора; 5 – перекося струму по фазах; 6 – температура генератора; 7 – блокування та захисти.



Рис. 2. Образно-кластерна модель станів технологічного процесу

Модель станів технологічного процесу дозволяє в режимі реального часу реагувати на зміни параметрів та передбачати розвиток передаварійних та аварійних станів об'єкта.

Висновки. Обґрунтована перспектива розвитку відновлювальної енергетики на базі МГЕС. Зазначені приклади успішного створення МГЕС в західних регіонах України. Обґрунтована актуальність удосконалення ІС, які виконують моніторинг та управління. Відзначені функціональні обмеження та недоліки існуючого комп'ютеризованого обладнання, які розроблені відомими фірмами: АВВ, Motorola, F&F, SPM, SCHENCK, YOKOGAWA та їх представництвами в Україні (ЕлектроСвіт, ТОВ «ТОВ «Йокогава електрик Україна»), ПП «Променергія».

Обґрунтована перспектива створення ІС на основі інтегрованих систем, які підвищують швидкодію реакції оператора на відхилення станів об'єктів від норми за рахунок глибокого статистичного, кореляційного, кластерного та ентропійного опрацювання вхідних даних. Викладені теоретичні засади запропонованого способу образно-кластерного відображення станів технологічного обладнання МГЕС та представлений приклад реалізації такої моделі.

Література

1. Карпаш О. М. Технічна діагностика бурового та нафтогазового обладнання : навч. посібник / О. М. Карпаш. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2007. – 272 с.
2. Заміховський Л. М. Основи теорії надійності і діагностики технічних систем : навч. посібник / Л. М. Заміховський, В. П. Калявін. – Івано-Франківськ : Полум'я, 2004. – 360 с.
3. Семенов Г. Н. Основи моніторингу технологічних об'єктів нафтогазової галузі : навч. посібник / Г. Н. Семенов, М. М. Дранчук, О. В. Гутак, Я. Р. Когуч, М. І. Когутян, Я. В. Куровець. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2010. – 808 с.
4. Офіційний сайт компанії АВВ [Електронний ресурс]. – Режим доступу : www.abb.com
5. Офіційний сайт фірми «ЕлектроСвіт» [Електронний ресурс]. – Режим доступу : www.es.ua
6. Офіційний сайт компанії «YOKOGAWA» [Електронний ресурс]. – Режим доступу : www.yokogawa.ua
7. Николайчук Я. М. Теоретичні засади та метод побудови образно-кластерної моделі оператора бурової установки / Я. М. Николайчук, Г. Я. Процок // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології : міжнар. наук.-техн. журнал. – 2015. – № 29. – С. 96–102.
8. Метод структуризації образно-кластерної моделі состояний квазистационарного об'єкта управління / Н.Я. Возна, Н.И. Алишов, Г.Я. Процок, Я.Н. Николайчук // Journal of Qafqaz University. Mathematics and Computer Science. – Baku. Azerbaijan, 2015. – Volume 3, № 2. – P. 105–115.
9. Пітух І. Р. Розширення критеріїв інтерактивності комп'ютеризованих систем / І. Р. Пітух // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології : міжнар. наук.-техн. журнал. – 2015. – № 29. – С. 30–34.
10. Nykolaychuk L. Theory and methodology of building information models in the field of law // Materials science problem intersectoral conference YUPIS-2011. – Ivano-Frankivsk, 2011. – P. 19–25.
11. Nykolaychuk L. Generalization of information models classes and communication interaction of the subjects of law of information society / L. Nykolaychuk // Proceedings of XIIIth International Conference CADSM'2015 (Lviv). – 2015. – P. 143–146.
12. Патент України № 107039. – 25.05.2016 р., Бюл. № 10.
13. Патент України № 68874. – 10.04.2012 р., Бюл. № 7.

References

1. Karpash O. Technical diagnostics drilling and natural gas equipment: manual. posibn. — Ivano-Frankivsk: IFSTUOG, 2007. — 272 p.
2. Zamikhovsky L. M. Fundamentals of the theory of reliability and diagnostics of technical systems: Teaching. manuals / L.M. Zamikhovsky, V.P. Kalyavin. - Ivano-Frankivsk: Flame, 2004. – 360 p.
3. Sementsov G. Basics monitoring of oil and gas industry: Teach. posibn. / G. Sementsov, M. Dranchuk, O. Kohutyak, Ya. Kohuch, Ya. Kurovets / Ivano-Frankivsk IFSTUOG, 2010. — 808 p.
4. www.abb.com.

5. Company "Elektrosvit" site. URL: www.es.ua
6. Company "YOKOGAWA" site. URL: www.yokogawa.ua
7. Nykolaichuk Ya. Theoretical foundations and method of construction of a figurative cluster model of a drilling rig operator / Ya. Nykolaichuk, H. Protsiuk // Optoelectronic information-power technologies: international scientific and technical journal. – 2015. – № 29. – P. 96–102.
8. Method of structuring the image-cluster model quasi state control object / N. Vozna, N. Alishov, G. Protsyuk, Ya. Nykolaichuk // Journal of Qafqaz University. Mathematics and Computer Science. – Baku. Azerbaijan, 2015. - Volume 3, № 2. - P.105–115/
9. Pitukh I. Expanding the criteria for interactive computer systems / I. Pitukh // Optoelectronic information-power technologies: international scientific and technical journal. – 2015. – № 29. – P. 30-34.
10. Nykolaychuk L. Theory and methodology of building information models in the field of law // Materials science problem intersectoral conference YUPIS-2011. – Ivano-Frankivsk, 2011. – P. 19–25.
11. Nykolaychuk L. Generalization of information models classes and communication interaction of the subjects of law of information society / L. Nykolaychuk // Proceedings of XIIIth International Conference CADSM'2015 (Lviv). – 2015. – P. 143–146.
12. Declarative Patent of Ukraine for Utility Model, Patent 107039. – May 10, 2016.
13. Declarative Patent of Ukraine for Utility Model, Patent 68874. – April 7, 2012.

Рецензія/Peer review : 18.4.2019 р.

Надрукована/Printed : 2.6.2019 р.

Рецензент: д.т.н., професор Я.М. Николайчук

ОПТИМАЛЬНИЙ БЛОКОВИЙ ПОШУК У ВИПАДКУ РІВНОМІРНОГО РОЗПОДІЛУ ЙМОВІРНОСТЕЙ ЗВЕРТАННЯ ДО ЗАПИСІВ

У роботі розглянутий оптимальний блоковий пошук у випадку рівномірного розподілу ймовірностей звертання до записів, якщо в локалізованому блоці використовується метод двійкового пошуку. Проведено дослідження оптимальної кількості порівнянь, необхідних для пошуку запису у файлі. Показано ефективність методу двійкового пошуку у порівнянні з використанням методу послідовного перегляду для пошуку запису у локалізованому блоці.

Ключові слова: рівномірний розподіл ймовірностей звертання до записів, блоковий пошук, метод двійкового пошуку, метод послідовного перегляду.

L.I. FUNDAK, H.H. TSEHELYK

Ivan Franko Lviv National University

OPTIMAL BLOCK SEARCH IN THE CASE OF A UNIFORM DISTRIBUTION OF PROBABILITIES OF ACCESS TO RECORDS

The purpose of the article is to investigate the effectiveness of the optimal block search in the case of a uniform distribution of the probabilities of access to records if the localized block uses the binary search method. Among the methods for finding information in large databases, the block search method is most effective. The essence of this method is as follows. If file entries ordered in ascending or decreasing values of a key, then it is not necessary to view all records preceding the searched for the record. Entries can be split into blocks and first locate the block containing the desired entry by viewing the latest block records. After the record block is localized, the search for the desired record in the block is continued using one of the methods below. Block search method investigated for different laws of distribution of the probabilities of access to records when used in a localized block to search for the method of sequential viewing. However, in the case of a uniform distribution of probabilities, the block search method can be made much more efficient by using the binary search method in the localized block. This case investigated in the work. The graphs show the dependence of the average number of comparisons between the number of records in the file and the number of blocks on which the file is split. A comparison of the effectiveness of two block search options (with using in block sequential viewing and binary search) is conducted. The average number of comparisons for the different number of records in the file for both methods was calculated and compared. It is shown, that using a binary search method to search for a record in a localized block, you can significantly reduce the average number of comparisons required to search for a record in a file.

Keywords: uniform distribution of probabilities of access to records, block search, binary search method, sequential search.

Вступ

Якщо записи файлу впорядковані за зростанням чи спаданням значень ключа, то для пошуку запису не обов'язково переглядати всі записи, що передують шуканому. Записи можна розбити на блоки і спочатку локалізувати блок, який містить шуканий запис, переглядаючи останні записи блоків. Після того, як блок записів локалізований, пошук потрібного запису у блоці продовжують за допомогою одного з розглянутих нижче методів.

В [1] побудовані оптимальні моделі блокового пошуку для різних законів розподілу ймовірностей звертання до записів у разі використання методу послідовного перегляду для пошуку запису у локалізованому блоці. Однак, у випадку рівномірного розподілу ймовірностей звертання до записів можна значно зменшити середню кількість порівнянь, необхідних для пошуку запису у файлі, якщо в локалізованому блоці використати метод двійкового пошуку.

Основна частина

Нехай усі записи впорядкованого файлу розбиті на n блоків по m записів у кожному, тобто кількість записів у файлі рівна $N = nm$. Вважатимемо, що розподіл ймовірностей звертання до записів є рівномірний. Тоді при використанні в локалізованому блоці методу послідовного перегляду середня кількість порівнянь, необхідних для пошуку запису у файлі, виражається формулою [1]

$$E' = \frac{1}{2}(n + m) + 1.$$

Функція E' є опуклою та існує єдина точка, у якій вона досягає мінімуму. У роботі [1] показано, що оптимальне значення функції досягається при $n = m = \sqrt{N}$.

Отже, оптимальне число порівнянь E' , необхідних для пошуку запису у файлі, обчислюватимемо за такою формулою

$$E'_{on} = \sqrt{N} + 1. \quad (1)$$

Нехай тепер кількість записів у впорядкованому файлі $N = (2^l - 1)n$, де n – кількість блоків, на які розбитий файл, а $(2^l - 1)$ – кількість записів у кожному блоці. Вважатимемо, що розподіл ймовірностей звертання до записів є рівномірний. Тоді при використанні в локалізованому блоці методу двійкового

пошуку середня кількість порівнянь, необхідних для пошуку запису у файлі, виражається формулою [2]

$$E'' = \frac{1}{2}(n+1) + \frac{1}{2^l - 1} \sum_{i=1}^l i 2^{i-1},$$

Оскільки [2]

$$\sum_{i=1}^l i 2^{i-1} = (l-1)2^l + 1,$$

то

$$E'' = \frac{1}{2}(n+1) + l - 1 + \frac{l}{2^l - 1}.$$

Знайдемо значення параметрів n і l , за яких середня кількість порівнянь E'' досягає мінімуму.

Надамо E'' у вигляді функції від однієї змінної. Для цього зробимо заміну змінних $n = \frac{N}{2^l - 1}$,

одержимо

$$E'' = \frac{1}{2^l - 1} \left(\frac{N}{2} + l \right) + l - \frac{1}{2}. \quad (2)$$

Для знаходження точки екстремуму функції (2) дістаємо рівняння [3]

$$2^l - l \ln 2 = 1 + \frac{1}{2} N \ln 2. \quad (3)$$

У [3] показано, що одержане рівняння має єдиний додатний корінь $l = l_o$, і цей корінь є точкою мінімуму опуклої функції $E'' = E''(l)$.

У табл. 1 наведені корені l_o рівняння (3) і обчислені за формулою (2) значення E''_{on} для різних N .

Таблиця 1

Оптимальне значення E''_{on} для різних N

l	$2^l - 1$	n	N	l_o	E''_{on}
1	1	10	10	2,65706	3,59976
2	3	10	30	3,81137	4,75407
2	3	50	150	5,83364	6,77633
2	3	100	300	6,77702	7,71971
3	7	10	70	4,83865	5,78135
3	7	50	350	6,99034	7,93304
3	7	100	700	7,96069	8,90339
4	15	10	150	5,83364	6,77633
4	15	50	750	8,05808	9,00077
4	15	100	1500	9,04201	9,9847
5	31	10	310	6,82231	7,765
5	31	50	1550	9,08876	10,0315
5	31	100	3100	10,08	11,0227
6	63	10	630	7,81222	8,75491
6	63	50	3150	10,1029	11,0456
6	63	100	6300	11,0981	12,0408
7	127	10	1270	8,80493	9,74764
7	127	50	6350	11,1095	12,0522
7	127	100	12700	12,1068	13,0495

На рис. 1, 2 показано поведінку l_o і E''_{on} для різних значень N .

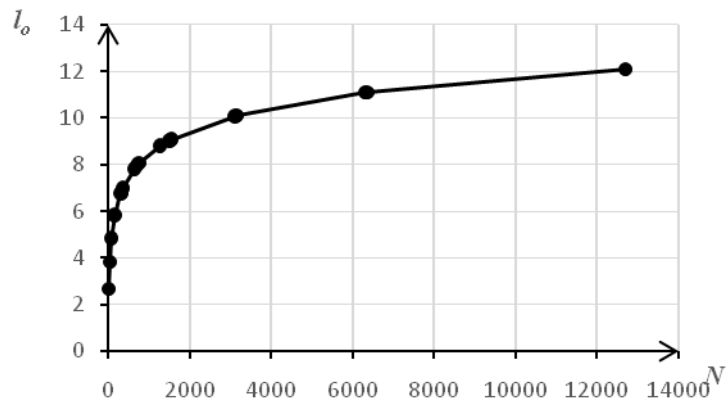


Рис. 1. Поведінка l_0 для різних значень N

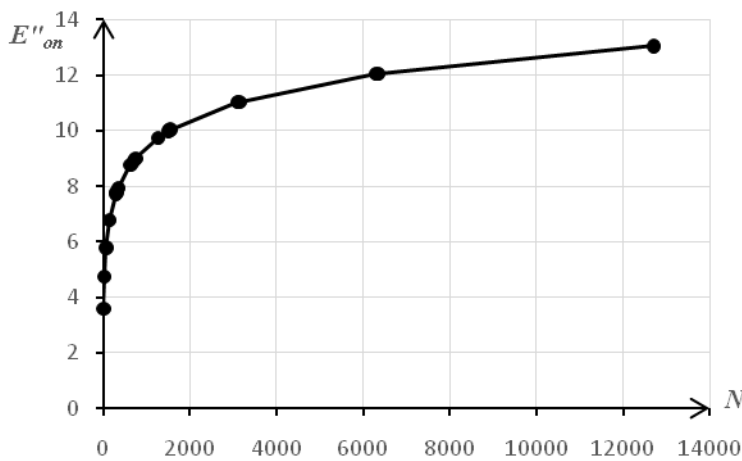


Рис. 2. Поведінка E''_{on} для різних значень N

На рис. 3 зображено графік поведінки функції E'' в околі точки мінімуму для $N = 300$, при якому оптимальне значення $l_0 \approx 6,777$, а $E''_{on} = 7,719$.

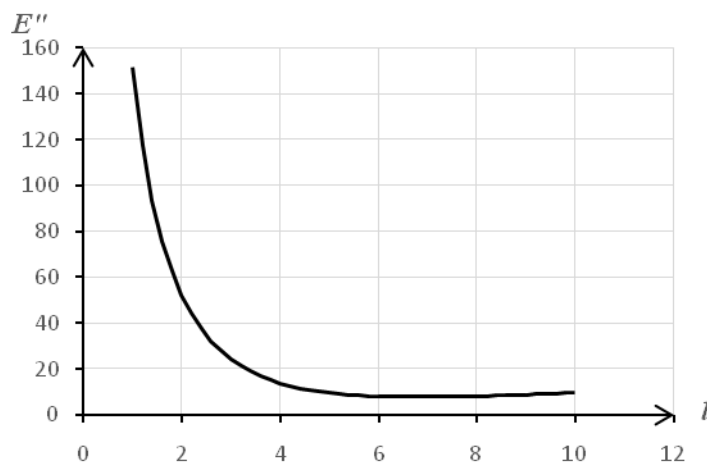


Рис. 3. Графік поведінки E'' в околі точки мінімуму для $N = 300$

Проведемо порівняльний аналіз оптимального значення числа порівнянь, необхідних для пошуку запису у файлі, у випадку використання в локалізованому блоці методу послідовного перегляду (E'_{on}) і методу двійкового пошуку (E''_{on}) для різних значень N . У табл. 2 наведено результати обчислень для обох методів.

Оптимального значення E'_{on} і E''_{on} для різних N

N	E'_{on}	E''_{on}
150	13,24745	6,77633
300	18,32051	7,71971
700	27,45751	8,90339
1500	39,72983	9,9847
3100	56,67764	11,0227
6300	80,37254	12,0408
12700	113,6943	13,0495

На рис. 4 зображено графік поведінки функцій E'_{on} і E''_{on} для різних значень N .

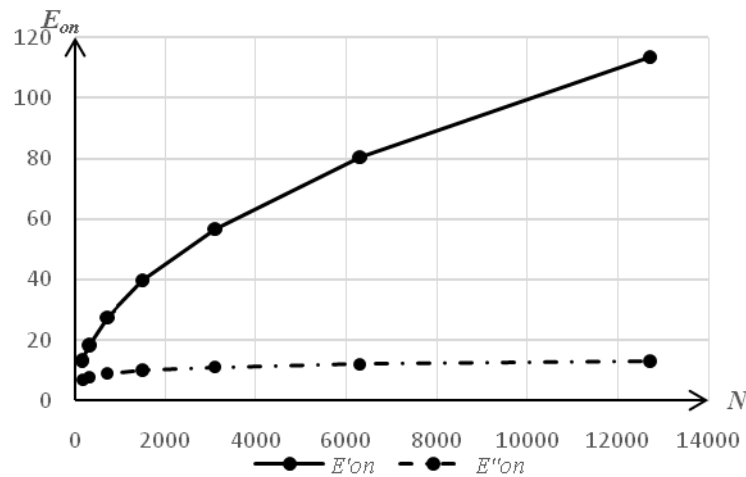


Рис. 4. Графік поведінки функцій E'_{on} і E''_{on}

Висновки

Проведено дослідження оптимальної кількості порівнянь, необхідних для пошуку запису в методі блокового пошуку при використанні в локалізованому блоці методу двійкового пошуку. Здійснено порівняльний аналіз блокового пошуку під час використання в локалізованому блоці методу послідовного перегляду і методу двійкового пошуку. Одержані результати показують, що у випадку рівномірного розподілу ймовірностей звертання до записів середня кількість порівнянь, необхідних для пошуку запису у файлі, буде значно меншою, якщо в локалізованому блоці використати метод двійкового пошуку.

Література

1. Цегелик Г.Г. Моделювання та оптимізація доступу до інформації файлів баз даних для однопроцесорних і багатопроцесорних систем : монографія / Г. Г. Цегелик. – Львів, 2010. – 192 с.
2. Цегелик Г. Г. Методы автоматической обработки информации / Г. Г. Цегелик. – Львов, 1981. – 132 с.
3. Фундак Л. І. Оптимальний блоковий пошук у випадку рівномірного розподілу ймовірностей звертання до записів / Л.І. Фундак, Г.Г. Цегелик // Матеріали XXIV Всеукр. наук. конф. “Сучасні проблеми прикладної математики та інформатики”. – Львів, 2018. – С. 166–168.

References

1. Tsehelyk H.H. Modeliuvannia ta optymizatsiia dostupu do informatsii failiv baz danykh dla odnoprotsesornykh i bahatoprotsesornykh system : monohrafiia / H. H. Tsehelyk. – Lviv, 2010. – 192 s.
2. Cegelik G. G. Metody avtomaticheskoi obrabotki informatsii / G. G. Cegelik. – Lvov, 1981. – 132 s.
3. Fundak L. I. Optymalniy blokovi poshuk u vypadku rivnomirnoho rozpodilu ymovirnostei zvertannia do zapysiv / L.I. Fundak, H.H. Tsehelyk // Materialy XXIV Vseukr. nauk. konf. “Suchasni problemy prykladnoi matematyky ta informatyky”. – Lviv, 2018. – S. 166–168.

Рецензія/Peer review : 15.5.2019 р.

Надрукована/Printed : 2.6.2019 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Притула М.М.

ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ АДАПТИВНОЇ КОМПЛЕКСНОЇ СИСТЕМИ ФІЛЬТРАЦІЇ КОНТЕНТУ

З розвитком інформаційно-комунікаційних технологій та імплементації мережі Інтернет майже в усіх сферах життєдіяльності суспільства виникає проблема розповсюдження в мережі Інтернет та проникнення до користувачів небажаного контенту, який може нанести користувачам як моральну, так і матеріальну шкоду. Одним зі шляхів вирішення цієї проблеми є фільтрація контенту, що поступає до користувача. Це призводить до формування науково-прикладного завдання щодо формування системи фільтрації контенту в мережі Інтернет, а також прикладного програмного забезпечення реалізації цього завдання, що обумовлює актуальність даного дослідження. Метою статті є формування та реалізація прикладного програмного забезпечення процесу адаптивної комплексної фільтрації контенту в мережі Інтернет. На основі запропонованої адаптивної комплексної системи фільтрації контенту (АКСФК), що відрізняється від існуючих тим, що завдяки постійному оновленню списків та профілю користувачів має більш високу якість фільтрації контенту, розроблено програмний продукт «Проксі Блокер», для якого в якості платформи розробки було обрано програмну оболонку Debian. Наведено послідовність проходження процедури фільтрації контенту. Виконано тестування програмного продукту «Проксі Блокер», яке показало, що чим рідше здійснюється сортування, тим швидше відбувається обробка запиту і навпаки. Сформовано математичну модель залежності часу обробки запиту від інтервалу сортування, що надасть змогу визначити подальшу динаміку змін часу обробки запиту при зростанні (скороченні, зміні кроку) інтервалу сортування. Результати моделювання свідчать, що з вірогідністю $R^2 = 0,9576$ модель залежності часу обробки запиту від інтервалу сортування має поліноміальну залежність четвертого ступеню. Моделювання здійснено методом апроксимації за допомогою стандартного програмного забезпечення Microsoft Office Excel. Виконано порівняння роботи запропонованої АКСФК та програмного продукту «Проксі Блокер» з існуючими на прикладі однієї з найбільш розповсюджених програм Rejik+Squid. Визначено, що середнє значення часу сортування під час застосування програми Rejik+Squid збільшується при збільшенні кількості запитів. Втім, аналогічні показники для програми «Проксі Блокер» у більшості проведених експериментів менші. Зокрема, лише у випадку одиночного запиту час обробки продуктом Rejik+Squid на 66% кращий, ніж при використанні програмного продукту «Проксі Блокер». Також на 17,1% швидше відбувається обробка запитів у разі, коли їх кількість становить 100000. В інших випадках розроблений програмний продукт «Проксі Блокер» показує кращий середній час обробки запитів, який в середньому на 2,5% менший за аналогічні показники продукту Rejik+Squid. Таким чином, розроблений програмний продукт «Проксі Блокер», на відміну від існуючих, показує кращі за часом результати фільтрації контенту, що свідчить на користь його застосування у АКСФК. Подальші дослідження будуть спрямовані на визначення швидкості проведення процедури фільтрації розробленою програмою у випадках рандомних запитів.

Ключові слова: фільтрація контенту, програмне забезпечення, адаптивна комплексна система, сортування, контент.

OLEKSANDR KNIAZIEV

Odessa National Academy of Telecommunications n.a. O.S. Popov

THE SOFTWARE OF ADAPTIVE COMPLEX SYSTEM OF THE FILTRATION OF THE CONTENT

With the development of information and communication technologies and the implementation of the Internet in almost all spheres of life of the society there is a problem of distribution on the Internet and penetration into users of unwanted content that can inflict on users both moral and material damage. One way to resolve this problem is to filter content that enters the user. This leads to the formulation of a scientific and applied task for the formation of a content filtering system on the Internet, as well as application software implementation of this task, which determines the relevance of this study. The purpose of the article is to create and implement application software of the process of adaptive integrated content filtering on the Internet. Based on the proposed Adaptive complex system of content filtering (ACSCF), which differs from the existing ones, due to the constant updating of the lists and user profile, the quality of content filtering is more profitable, the software product «Proxy Bloker» was developed, for which the software was chosen as the development platform. Debian shell. The sequence of passing the content filtering procedure is shown. Testing of the «Proxy Bloker» software was performed, which showed that the more rarely the sorting is done, the faster processing of the request and vice versa. The mathematical model of the dependence of the processing time of the query on the sorting interval, the prolongation of which will allow to determine the further dynamics of changes in the processing time of the query with the growth (reduction, change of step) of the sorting interval. The simulation results indicate that, with probability $R^2 = 0,9576$, the model of the dependence of the processing time of the query on the sorting interval has a polynomial dependence of the fourth degree. The simulation was carried out by the approximation method using the standard Microsoft Office Excel software. A comparison of the work of the proposed ACSCF and the «Proxy Bloker» product software with the existing one, based on the example of one of Rejik+Squid most popular programs, has been made. It is determined that the average time of sorting when applying Rejik+Squid program increases with increasing the number of requests. However, similar rates for the «Proxy Bloker» program are lower in most of the experiments conducted. In particular, only in the case of a single query processing time by Rejik+Squid is 66% better than when using «Proxy Bloker» software. Also 17,1% faster processing requests in the case when their number is 100000. In other cases, the developed software «Proxy Bloker» shows a better average query processing time, which is on average 2,5% lower than the similar indicators of the product Rejik+Squid. The «Proxy Bloker» software program, in contrast to the existing ones, shows the best results in terms of content filtering, which proves the benefit of its use in ACSCF. Further research will be aimed at determining the speed of the filtration procedure developed by the program in cases of random requests.

Keywords: content filtering, software, adaptive complex system, sorting, content.

Вступ. Розвиток інформаційно-комунікаційних технологій та імплементація мережі Інтернет майже в усі сфери життєдіяльності суспільства призводить як до позитивних, так і негативних наслідків. Серед останніх слід визначити несанкціоноване проникнення до користувачів небажаної чи забороненої інформації, яка не була затребувана. Тобто існує проблема розповсюдження в мережі Інтернет та проникнення до користувачів небажаного контенту (заборонених ресурсів, політичної та іншої пропаганди, торгівельної реклами, вірусних програм тощо), який може нанести користувачам як моральну, так і матеріальну шкоду (моральні травми, крадіжки інформації та коштів з рахунків тощо). Одним із шляхів вирішення цієї проблеми є фільтрація контенту, що поступає до користувача. Це призводить до формулювання науково-прикладного завдання щодо формування системи фільтрації контенту в мережі Інтернет, а також прикладного програмного забезпечення реалізації цього завдання, що обумовлює актуальність даного дослідження.

Аналіз. У практиці фільтрації контенту розроблена та функціонує низка продуктів, спрямованих на запобігання несанкціонованого доступу до ресурсів чи недопуску до небажаних ресурсів. Так, Воробієнко П., Каптур В. та Коляденко В. наводять теоретичні та прикладні механізми обмеження доступу до нецільових ресурсів мережі Інтернет [1]. Козевич О. та Комарова Н. розглядають фільтрацію контенту як технологію комплексного контролю Інтернет-ресурсів [2, 3]. Отт А. висвітлює сучасні тенденції в сфері контентної фільтрації [4]. Кузьміч А. визначає законодавчі аспекти регулювання методів фільтрації шкідливого інтернет-контенту [5]. У [6] досліджено низку існуючих програмних продуктів, що можуть бути застосовані для фільтрації контенту.

До продуктів, які мають широке розповсюдження серед користувачів мережевих послуг, можна віднести Content Protect, Cyber Patrol, Cyber Sentinel, Filter Pak, McAfee Parental Controls, Cyber Sitter, Net Nanny, Norton Parental Controls та інші. Наведені та інші програмні продукти розроблені на підставі інтелектуального алгоритму аналізу та можливості пропускати чи затримувати певні ресурси в режимі динамічної фільтрації, перелік яких визначає чи виробник, чи користувач. Втім, означені продукти недосконалі, оскільки більшість з них здійснюють попередження про небажаний контент замість заборони його потрапляння, мають низку чутливості та можуть біти налаштовані на ігнорування усіх чи деяких заборон. До того ж лише деякі з продуктів здійснюють аналіз об'єктів, більшість – забороняють чи пропускають контент без аналізу. Також до недоліків існуючих продуктів можна віднести відсутність у більшості з них функції фільтрації та моніторингу чатів, через які приховано також може потрапляти заборонений чи небажаний контент.

Також існують контент-фільтри для роутерів (наприклад, SkyDNS), які більш зручні у користуванні, оскільки дозволяють фільтрувати контент на всіх пристроях, що використовують доступ до Інтернету через роутер. Тобто відпадає необхідність контролювати та обслуговувати кожний пристрій у домашній чи корпоративній мережі, що суттєво економить час та кошти. Втім, ці фільтри потребують системного адміністрування та, як правило, мають суттєву вартість.

Наявність низки недоліків та проблемних аспектів в діяльності існуючих програмних продуктів обумовлює актуальність розробки такого програмного продукту, який би мав за мету подолати найбільш проблемні аспекти функціонування існуючих програм.

Автором у попередніх працях запропоновано (у співавторстві) бачення вирішення науково-прикладної задачі фільтрації контенту шляхом формування адаптивної комплексної системи фільтрації контенту в мережі Інтернет [7]. Втім, запропонована теоретико-прикладна розробка потребує відповідного програмного забезпечення, яке надає можливість практичного застосування розробленої системи фільтрації контенту.

Мета статті пов'язана із формуванням та реалізацією прикладного програмного забезпечення процесу адаптивної комплексної фільтрації контенту в мережі Інтернет.

Основна частина. Сьогодні вітчизняні провайдери активно розвивають власні програми, які базуються на низці найбільш розповсюджених механізмів фільтрації web-контенту в мережі Інтернет. Одним з значущих елементів впровадження та реалізації системи фільтрації контенту в мережі Інтернет є розробка, тестування та формування базових принципів, розробка відповідного алгоритму та програмної оболонки системи фільтрації контенту.

У попередніх роботах [7] сформовано теоретичне бачення процесу фільтрації контенту та прикладні засади роботи адаптивної комплексної системи фільтрації контенту (АКСФК) в мережі Інтернет, суть якого полягає у знаходженні системою потоку запитів від користувачів (груп користувачів), визначення типу запиту (URI, IP-адресу тощо), перевірці запиту на відповідність «чорному» та «білому» спискам та прийняттю рішення щодо блокування або надання доступу до ресурсу. АКСФК має зворотний зв'язок з користувачем для інформування його про блокування запиту та/чи ресурсу, якщо система визначила запитуваний ресурс шкідливим (на основі збігу в «чорному списку»). Розроблена АКСФК відрізняється від існуючих тим, що завдяки постійному оновленню списків та профілю користувачів має більш викусу якість фільтрації контенту, а завдяки оптимізації процедури фільтрації (скасування зайвих процедур) зменшує час оброблення запитів користувачів.

Послідовність роботи АКСФК полягає в такому: в АКСФК надходить потік запитів від користувачів (груп користувачів), після чого система визначає тип запиту (URI, IP-адресу тощо). Далі здійснюється перевірка на наявність користувача в базі даних системи. В разі відсутності профілю конкретного

користувача відбувається його додавання в систему та починається фільтрація небажаного контенту за умовчанням.

Якщо ж профіль користувача присутній в базі даних, то для нього застосовується механізм, який підбирає найкращу (у даному випадку) послідовність використання способів і процедур фільтрації за умови найбільшої ймовірності спрацювання системи. Вибір оптимальної послідовності стає можливим завдяки збереженню в базі даних інформації про засоби і процедури, які для кожного конкретного користувача (або групи користувачів) спрацювали кращим чином.

Далі відбувається процедура фільтрації небажаного контенту шляхом застосування оптимальної послідовності засобів і процедур для кожного конкретного випадку, в результаті чого приймається рішення про блокування або ж надання доступу до запитуваного ресурсу. Одночасно в процесі роботи АКСФК відбувається постійне оновлення даних як про кожного користувача, так і про прийняті рішення щодо блокування або надання доступу. Ця інформація надалі використовується для прийняття рішення про вибір найкращої послідовності засобів і процедур фільтрації, що, як було вказано вище, дозволяє прискорити процес фільтрації.

Для реалізації прикладного програмного забезпечення функціонування адаптивної комплексної фільтрації контенту в мережі Інтернет відповідно до наведеної послідовності в якості платформи розробки було обрано програмну оболонку Debian, оскільки вона надає змогу провести подальше тестування та порівняння двох різних програм (розробленої і тієї, яку біде обрано для порівняння) в єдиній оболонці.

Розглянемо детально процес проходження процедури фільтрації контенту за допомогою розробленого програмного продукту, що має робочу назву «Проксі Блокер», що складається в виконанні послідовності наступних кроків.

1. Процес запуску програмного продукту супроводжується підключенням користувача до програмної оболонки Debian через віртуальну машину VirtualBox. Для запуску програмної оболонки необхідно здійснити її попереднє налаштування. Для цього у файлі (application.properties) відбувається налаштування необхідних параметрів роботи програми. Задля цього прописуються такі параметри:

application.proxy.test.port=8182 (підключення програми «Проксі Блокер»);

banlists.root.path=/banlists (шлях до бан-листів);

iphistory.persisting.interval.minutes=5 (команда, завдяки якій кожні 5 хвилин здійснюється збереження історії відвідування);

banlists.sorting.enabled=true (включення чи відключення процедури сортування, де **true** – сортування включено, а **false** – відповідно сортування вимкнено);

banlists.sorting.interval.seconds=300 (час, протягом якого буде здійснюватися включення сортування бан-листів (у даному випадку сортування вмикається кожні 5 хвилин));

webclient.connect.timeout=5000 (час на з'єднання із сайтом, який запитує користувач);

webclient.read.timeout=10000 (час на зчитування контенту з сайту (якщо час зчитування буде перевищувати той, який передбачено програмою, запит буде скасовано).

2. Після налаштування файлу application.properties відбувається перехід до браузера. У меню налаштування браузера необхідно встановили параметр Proxu (**8182** для тестування програми «Проксі Блокер»).

3. Далі програма переходить до оболонки Debian, де відбувається запуск терміналу. У цьому терміналі здійснюється перехід в режим адміністратора за допомогою команди: **su**. Після цього для отримання доступу до подальших налаштувань необхідно ввести пароль для адміністратора. У результаті отримання доступу на терміналі буде відображена команда: **root@debian:**

4. Наступним кроком є перехід до каталогу, де знаходиться програма, за допомогою команди **/cd**. Після цього потрібно здійснити запуск програми за допомогою команди **./start.sh**. У терміналі буде відображений процес запуску програмного продукту. Закінчення запуску програми буде супроводжуватися рядком: **Starting Filtering Application in 30,053 seconds** (де 30,053 – час запуску програми).

5. Далі у браузері за допомогою наведених нижче команд потрібно здійснити обчислення часу обробки запитів, що надходять, у різних варіантах використання системи, створюючи при цьому імітацію її працездатності різними користувачами:

http://localhost:8080/statistics – (збирання статистичних даних щодо часу обробки запитів)

http://localhost:8080/?calls=10 – (10 випадкових запитів на випадковий бан-лист)

http://localhost:8080/?calls=10&banlistName=news (10 запитів на бан-лист під назвою **news**)

Результати проведеної процедури можна побачити в терміналі, а також в загальному консольному меню, де наводиться уся статистична інформація. Для цього в браузері необхідно прописати команду **http://localhost:8080/h2-console**

6. В процесі переходу в загальне консольне меню можна спостерігати появу різноманітної статистики, а саме:

BAN_LIST:

NAME – найменування бан-листів

IP_HISTORY:

IP – IP-адреса, з якої було здійснено запит

COUNTER – кількість запитів

BAN_LIST_NAME – ім'я бан-листа, на яке було здійснено запит

STATISTICS:

CALLS – кількість запитів

ELAPSED – час обробки запитів

SORTING_ENABLED – (True – сортування включено; False – сортування вимкнено)

START_DATE – (дата та час запуску запитів, що надходять)

IP_TO_BAN_LIST_ORDER:

IP – IP-адреси, з яких відбувалися запити

IP_TO_BAN_LIST_ORDER_BAN_LISTS:

IP_TO_BAN_LIST_ORDER_IP – IP-адреси, з яких відбувалися запити

BAN_LIST_NAME – найменування бан-листа, що відвідувався

7. Надалі процес виводу статистики в терміналі буде супроводжуватися наступними командами:

Calls to process: 100 (кількість запитів, що обробляються)

Time spend= [1,879025] (час обробки 100 запитів)

При включенні сортування в файлі **application.properties**, а також налаштування часового параметра її включення (**banlists.sorting.enabled=true; banlists.sorting.interval.seconds=300**) в терміналі буде відбиватися включення сортування кожні 5 хвилин за допомогою наступних команд:

Sorting started

Sorting completed

8. Для того, щоб здійснити тестування іншого програмного продукту, необхідно зупинити програму, що працює. Для цього в терміналі прописується команда: **./stop.sh**

Результат зупинки буде відображений у терміналі: **Stopping server**

Далі здійснюється налаштування файлу **application.properties** за процедурою, що описана вище.

9. При спробі входу через браузер на ресурс, що перебуває в бан-листах, в результаті роботи АКCFK буде виведена наступна інформація (рис. 1).

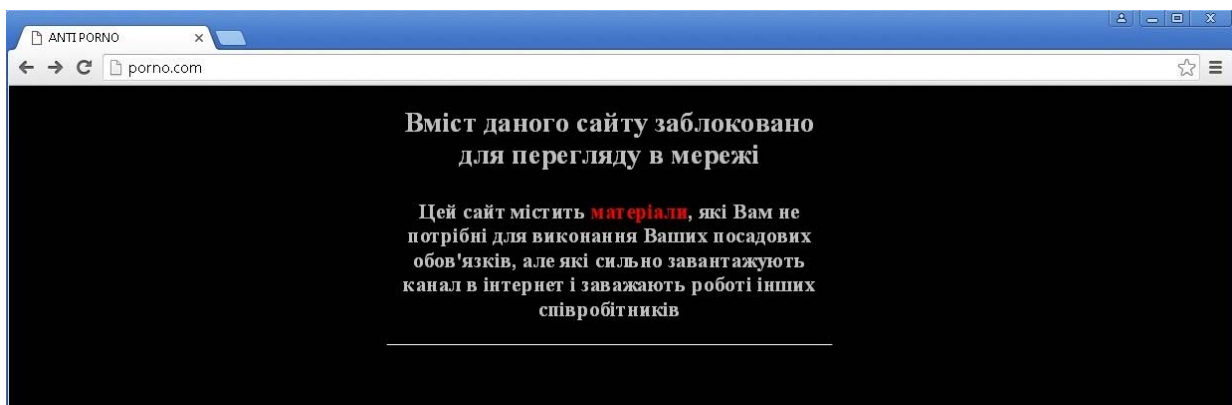


Рис. 1. Приклад повідомлення про заборону доступу до ресурсу (результат роботи АКCFK через програму «Проксі Блокер»)

На рис. 1 наведено приклад інформування користувача про заборону доступу до ресурсу, який він запитував. Текст, який наводиться на екрані, може бути змінено на будь-яке інше інформаційне повідомлення аналогічного змісту (тобто містити заборону доступу), а також наводитися будь-якою мовою, зручною для користувача та адміністратора ресурсу. Ці параметри змінюються в процесі налаштування програми «Проксі Блокер». Таке або аналогічне повідомлення буде застосовуватися до усіх заборонених ресурсів, на які буде здійснюватися спроба доступу від користувача.

В якості тестування розробленого програмного продукту було проведено експеримент, який полягав у розташуванні списку заборонених ресурсів на перші позиції «Проксі блокеру» при однаковій кількості запитів (2000 запитів) із інтервалом сортування у п'ять хвилин.

Параметри сортування сформовані в такий спосіб:

banlists.sorting.enabled=true

banlists.sorting.interval.seconds=300

Через ці команди здійснюється включення сортування. Інтервал включення сортування з подальшим перерозподілом досліджуваного бан-листа становить 5 хвилин. Кількість запитів, що надходять,

як вже визначалося вище, фіксуємо на числі 2000 запитів наступною командою:

<http://localhost:8080/?calls=2000&banlistName=webtv> (2000 запитів на бан-лист з іменем webtv).

В результаті проведення 12 спроб отримано результати, які свідчать, що за цих умов час обробки запиту скорочується при зростанні інтервалу сортування (табл. 1).

Таблиця 1

Результати експерименту з підняття списку заборонених ресурсів на перші позиції «Проксі Блокеру» при однаковій кількості запитів (2000 запитів)

Інтервал сортування, хвилини	Час обробки запиту, секунди	Скорочення часу обробки запиту (порівняно із попередніми значеннями), %
5	46,387	-
10	27,329	1,69
15	25,532	1,07
20	23,584	1,08
25	23,344	1,01
30	21,444	1,08
35	21,419	1,001
40	20,756	1,03
45	3,409	6,1
50	2,892	1,17
55	2,693	1,07
60	2,595	1,03

Джерело: власні розрахунки

Дані табл. 1 свідчать, що чим рідше здійснюється сортування, тим швидше відбувається обробка запиту і навпаки. Це пояснюється навантаженням на сервіси. Втім, не визначено прямої лінійної залежності часу обробки запиту від інтервалу сортування. Як видно, між інтервалом сортування 5 та 10 хвилин спостерігається стрибок скорочення часу обробки запиту майже на 70%, а в інтервалі 20 та 45 хвилин стрибок скорочення часу обробки запиту більше ніж у 6 разів (із 20,75 до 3,4 секунд).

Означені стрибки мають місце тому, що відбувається перерозподіл положення бан-листа (із заданим інтервалом) на віщі позиції до моменту, поки досліджуваний бан-лист не буде знаходитися на першому місці у списку. Так, у зазначених інтервалах часу між 5–10 і 40–45 хвилинами сортування, досліджуваний бан-лист перерозподілиться на декілька (чотири чи п'ять) позицій уперед.

Сформуємо математичну модель залежності часу обробки запиту від інтервалу сортування, пролонгація якої надасть змогу визначити подальшу динаміку змін часу обробки запиту при зростанні (скороченні, зміні кроку) інтервалу сортування. Моделювання здійснимо методом апроксимації за допомогою стандартного програмного забезпечення Microsoft Office Excel (рис. 2).

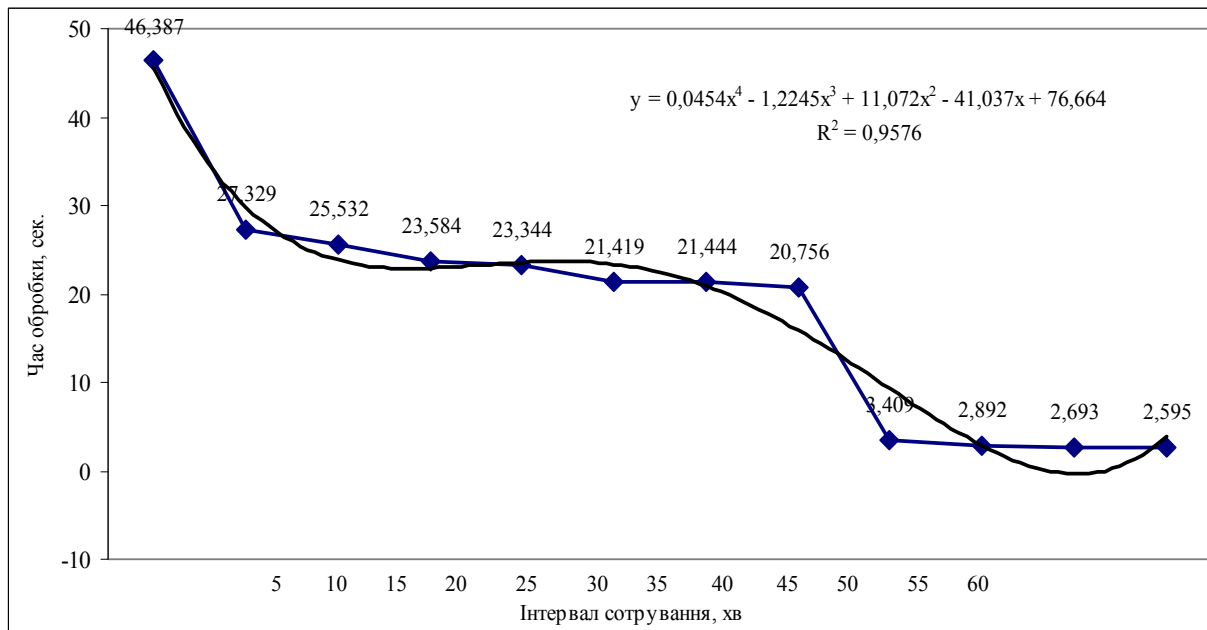


Рис. 2. Залежність часу обробки запиту від інтервалу сортування

Результати моделювання свідчать, що із вірогідністю $R^2 = 0,9576$ модель залежності часу обробки запиту від інтервалу сортування має поліноміальну залежність четвертого ступеню виду:

$$y = 0,0454x^4 - 1,2245x^3 + 11,072x^2 - 41,037x + 76,664 \quad (1)$$

На графіку наочно видно, що побудована за формулою (1) крива достатньо адекватно відбиває реальні дані, отримані в результаті експерименту. Також, відповідно до рис. 2, слід визначити, що в разі, коли досліджуваний бан-лист на початку знаходиться на останньому місці, час його обробки завжди буде максимальний (в межах даних, отриманих в експерименті).

Також в роботі проведено порівняння розробленого програмного продукту «Проксі Блокер» із існуючими. Для порівняння обрано одну з найбільш розповсюджених програм Rejik+Squid [8], яка є у вільному доступі та дозволяє проводити маніпуляції із операторами.

Порівнюючи роботу запропонованої АКCFК та програмного продукту із існуючими (тобто обраною програмою Rejik+Squid), в ході тестування отримано низку результатів експериментів (табл. 2).

Таблиця 2

Результати експериментів із порівнянням швидкості обробки запитів розробленого програмного продукту «Проксі Блокер» та існуючих продуктів (на прикладні програми Rejik+Squid)

Експеримент	Середній час обробки запитів* (секунд), при фіксованій кількості запитів, що надходять					
	Кількість запитів, що надходять					
	1	100	1000	10000	100000	500000
Імітація запитів, що надходять на останній бан-лист в списках, що використовуються у програмному продукті Rejik+Squid	0,00328	0,6093	3,66996	32,549	308,179	1588,32
Імітація запитів, що надходять на останній бан-лист в списках, що використовуються у програмному продукті «Проксі Блокер»	0,0053	0,577	3,652	32,316	361,149	1548,67
Абсолютна зміна часу обробки у «Проксі Блокер» порівняно із Rejik+Squid, +/-	+0,00212	-0,03234	-0,0179	-0,233	+52,97	-39,65
Відносна зміна часу обробки у «Проксі Блокер» порівняно із Rejik+Squid, %	+66%	-5,3%	-0,3%	-0,7%	+17,1%	-2,5%
Імітація запитів, що надходять на перший бан-лист в списках в результаті повного сортування на базі програмного продукту «Проксі Блокер»	0,00206	0,1863	1,6022	14,856	124,132	620,21
Відносна зміна часу обробки «Проксі Блокер» у випадку, коли запит потрапляє на перший бан-лист в списках	157%	209%	127%	117%	190%	149%

Джерело: отримано автором

* В ході експериментів здійснено по десять пробних тестів роботи програмного продукту. Середній час обробки запитів (секунд) отримано як проста середньоарифметична.

Так, можна побачити, що при запиті на останній лист списку заборонених ресурсів, які використовуються у програмному продукті Rejik+Squid, середнє значення часу сортування природно збільшується при збільшенні кількості запитів. Втім, аналогічні показники для програми «Проксі Блокер», що розроблена автором, у більшості проведених експериментів менші за результати експериментів з існуючими продуктами. Зокрема, лише у випадку одиночного запиту час обробки продуктом Rejik+Squid на 66% кращий ніж при використанні програмного продукту «Проксі Блокер». Також на 17,1% швидше відбувається обробка запитів у разі, коли їх кількість становить 100000. В інших випадках розроблений програмний продукт «Проксі Блокер» показує кращий середній час обробки запитів, який в середньому на 2,5% менший за аналогічні показники продукту Rejik+Squid.

Також визначено, що у випадку, коли запит потрапляє на перший бан-лист в списках в результаті повного сортування на базі програмного продукту «Проксі Блокер», середній час обробки запиту скорочується порівняно із тим, коли запит потрапляє на останній бан-лист в списках за обома програмними продуктами. Зокрема, час обробки запитів «Проксі Блокер» у випадку, коли запит потрапляє на перший бан-лист в списках (порівняно із тим, коли запит потрапляє на останній лист тієї ж програми) наведено в останньому рядку табл. 2. У середньому час скорочується на 158,16%.

Таким чином, розроблений програмний продукт, на відміну від існуючих, показує кращі за часом результати фільтрації контенту, що свідчить на користь його застосування у АКCFК.

Висновки

Існуюча проблема проникнення до користувачів через мережу Інтернет небажаного чи забороненого контенту породжує необхідність формування систем захисту від несанкціонованого чи забороненого втручання в особистий інформаційний простір користувачів та в діяльність організацій. Одним зі шляхів вирішення цієї проблеми є формування систем фільтрації контенту та прикладного програмного забезпечення цієї фільтрації.

В роботі надано основні теоретичні засади розробленої адаптивної комплексної системи фільтрації контенту (АКСФК), наведено процедуру проходження фільтрації в системі та запропоновано розроблений автором програмний продукт «Проксі Блокер», який реалізує відповідний алгоритм АКСФК. Наведено основні процедури та оператори програми, проведено її тестування та сформовано математичну модель залежності часу обробки запиту від інтервалу сортування при однаковій кількості запитів. Встановлено, що не існує прямої лінійної залежності часу обробки запиту від інтервалу сортування. При перерозподілі положення бан-листа (із заданим інтервалом) на позиції спостерігаються стрибки скорочення часу обробки запиту (в деяких випадках більш, ніж у шість разів – із 20,75 до 3,4 секунд).

Проведено порівняння розробленого програмного продукту «Проксі Блокер» з іншими (на прикладі застосування програмного продукту Rejik+Squid), в ході чого встановлено, що середній час сортування у розробленому програмному продукті «Проксі Блокер» за результатами експериментів на 2,5% швидше. У випадку, коли запит потрапляє на перший бан-лист в списках в результаті повного сортування на базі програмного продукту «Проксі Блокер», середній час обробки запиту скорочується у середньому на 158,16% порівняно із тим, коли запит потрапляє на останній бан-лист в списках за обома програмними продуктами.

Таким чином, розроблений програмний продукт «Проксі Блокер», на відміну від існуючих, показує кращі за часом результати фільтрації контенту, що свідчить на користь його застосування у АКСФК.

Подальші дослідження будуть спрямовані на визначення швидкості проведення процедури фільтрації розробленою програмою у випадках рандомних запитів.

Література

1. Воробієнко П.П. Єдина система обмеження доступу до нецільових ресурсів мережі Інтернет в освітніх закладах України / П.П. Воробієнко, В.А. Каптур, В.А. Коляденко, В.О. Самодід // Комп'ютер у школі та сім'ї. – 2009. – № 8. – С. 30–34.
2. Козевич О. П. Контентна фільтрація – технологія комплексного контролю Інтернет-ресурсів. Основні підходи і проблеми / О. П. Козевич // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2013. – № 774: Автоматика, вимірювання та керування. – С. 138–145.
3. Комарова Н. Технологія комплексної безпеки інтернет-контента / Н. Комарова // Information Security. – 2008. – № 4. – С. 32–33.
4. Отт А. Современные тенденции в области контентной фильтрации / А. Отт // Информационный бюллетень “JET INFO”. – 2012. – С. 3–23.
5. Кузьміч А. Законодавче регулювання та способи фільтрації шкідливого Інтернет-контенту: міжнародний досвід [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://telpu.com.ua/archives/1872>
6. Программы контроля Internet-контента [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://itc.ua/articles/programmy_kontrolya_internet-kontenta_18021/
7. Каптур В.А. Метод адаптивної оцінки URL в комплексних системах фільтрації контенту / В.А. Каптур, О.А. Князев // Наукові праці ОНАЗ. – Одеса, 2016. – № 1. – С. 35–45.
8. Блокування за допомогою Rejik+Squid [Електронний ресурс]. – Режим доступу: Rejik.ru

References

1. Vorobiyenko P. Uniform system of restriction of access to no-purpose resources of a network the Internet in educational institutions of Ukraine / P. Vorobiyenko, V. Kaptur, V. Koliadenko, V. Samoid // Computer in a family and school. – 2009. – № 8. – P. 30-34.
2. Kozevich O. Content a filtration - technology of complex control of Internet resources. The basic approaches and problems / O. Kozevich // Visnyk of Lviv university. - 2013. - № 774: Series of automation, measurement and control. - P. 038-145.
3. Komarova N. Technology of complex safety the content Internet / Komarova N. // “Information Security”. – 2008. – № 4. – P. 32–33.
4. Ott A. Modern lines in area контентной filtrations / A. Ott // The Newsletter “JET INFO”. – 2012. – P. 3–23.
5. Kuzmich A. Legislative regulation and ways of a filtration of a content harmful the Internet: the international [Electron resource]. – Access mode: <http://telpu.com.ua/archives/1872>
6. Programs of control content of Internet [Electronic resource]. – Access mode: https://itc.ua/articles/programmy_kontrolya_internet-kontenta_18021/
7. Kaptur V. Method of adaptive estimation URL in complex systems of a filtration of a content / V. Kaptur, O. Kniaziev // Proceedings of the O. S. Popov ONAT, 2016. – № 1. – P. 35-45.
8. Blocking on a basis Rejik+Squid [Electron resource]. – Access mode: Rejik.ru

Рецензія/Peer review : 3.5.2019 р. Надрукована/Printed : 2.6.2019 р.

Прорецензовано редакційною колегією

DOI 10.31891/2307-5732-2019-273-3-215-219

УДК 621

К.Л. ГОРЯЩЕНКО, О.В. ШЕВЧУК

Хмельницький національний університет

ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ ЛИНИЙ СВЯЗИ В СТАНДАРТЕ TMN

Стандарт TMN направлен на обеспечение функционирования телекоммуникационной сети любой топологии. В стандарте представлены вопросы обеспечения как технических средств контроля, так и средств принятия решения о структуре сети. Важным элементом структуры являются технические средства обеспечения надежности работы сети. Стандарт TMN вводит в структуру телекоммуникационной системы как обязательный элемент узлов передачи узлы физического уровня контроля над самой линией. Открытым вопросом в стандарте остается физическая и техническая реализация узлов, которые будут отвечать за обеспечение работы самого стандарта на практике.

Ключевые слова: надежность линии, TMN.

K.L. HORIASCHENKO, O.V. SHEVCHUK

Khmelnyskyi National University, Ukraine

RELIABILITY ENSURING OF THE OPERATION OF TELECOMMUNICATION LINES IN TMN STANDART

The TMN standard is aimed at ensuring the functioning of the telecommunications network of any topology. The standard presents the issues of providing both technical means of control and means of making decisions about the network structure. An important element of the structure is the technical means to ensure the reliability of the network.

The TMN standard introduces into the structure of a telecommunication system, as a mandatory element of the transmission nodes, the physical level nodes of control over the line itself. An open question in the standard is the physical and technical implementation of the nodes that will be responsible for ensuring the work of the standard itself in practice.

The main disadvantages of TMN include the following: 1) TMN technology originates from theory, not from practice; 2) TMN technology from a technical point of view did not work, so that it could be put into practice in the form of a specific completed system; 3) the technical implementation of the basic rules of TMN is governed by whole sets of recommendations that are not localized in the M series and were developed in different years by different groups of specialists.

Keywords: line reliability, TMN.

Сети связи, которые являются совокупностью узлов и линий между ними, предназначены для транспортировки сообщений в виде электрических сигналов от источника сообщений к получателю. Для реализации услуг связи недостаточно создать оптимально построенные сети связи и соответствующее оборудование. Необходимо создать вспомогательные службы, системы, надстройки над сетью связи, которые в условиях запросов потребителей, количество которых растет, обеспечили бы ее стойкое функционирование в течение всего срока службы аппаратуры и внешних дестабилизирующих действий.

К таким надстройкам относятся системы технической эксплуатации, нумерации, тарификации, расчетов за услуги связи и ряд других. Полный перечень систем зависит от конкретного вида сети связи (первичная, вторичная и так далее). Совокупность этих систем поддерживает сеть электросвязи, обеспечивая ее функционирование и необходимый уровень показателей для удовлетворения требований потребителей. Перечисленные "системы поддержки" объединяются общим понятием – система управления, которая неразрывно, в замкнутом контуре с обратной связью, взаимодействует с сетью электросвязи через обусловленные интерфейсы. Интерфейсы есть устройству (программно-аппаратные средства) для согласования технических средств системы управления, системы технической эксплуатации и сети связи.

В целом, сеть электросвязи можно рассматривать как кибернетическую систему, которая включает объект управления ОУ (подсистема управления) и системы управления СУ (подсистема управления), связанных между собой потоками контрольной информации, которая управляет, и что подвергаются внешнему действию.

При этом внешними по отношению к сети действиями являются как планы и директивы, которые поступают от вышестоящих организаций (из верхних уровней управления) и требования по доставке сообщений и предоставлению других услуг, поступают от пользователей, так и разные действия или отказы (неисправности) отдельных элементов, которые нарушают ход процесса.

Под регулированием входа имеется в виду установка параметров (показателей качества, скорости доставки и так далее) для взаимодействия ОП с сетью связи, а контроль выхода – это измерение этих параметров.

В отрасли связи роль управления в развитии и совершенствовании сетей значительно повышается. Если ранее управления понимало как составная часть технической эксплуатации вместе с техническим обслуживанием, то в настоящее время управление рассматривается как более широкое понятие, которое включает техническую эксплуатацию как важную составную часть всего процесса обеспечения качества функционирования линии.

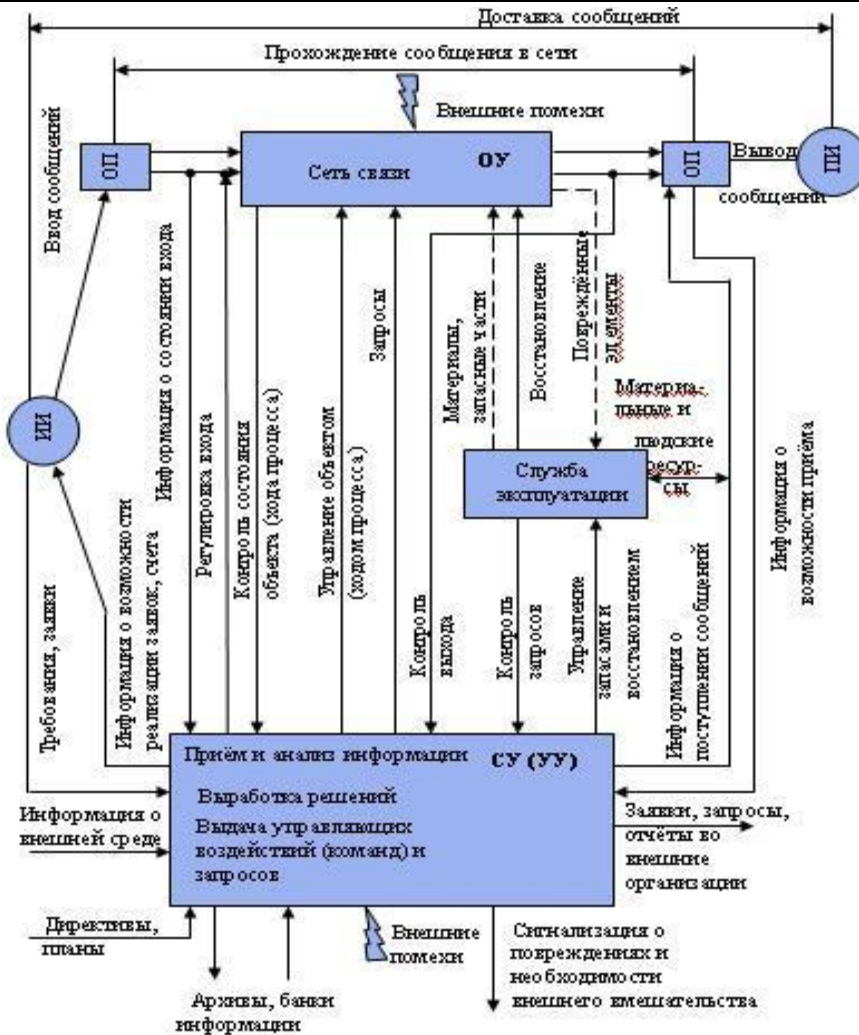


Рис. 1. Модель системы управления сетью связи
 ИИ – источник информации; ОП – краевой пункт; ПИ – потребитель информации

Основная часть

В системе технической эксплуатации выделяют ряд подсистем, таких как подсистема контроля, измерений и резервирования, расчетов и др. (рис. 2).

Система связи

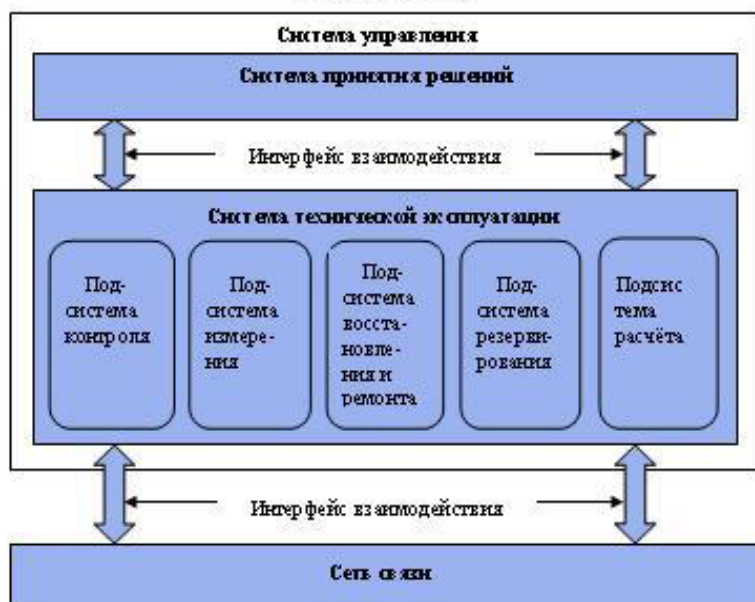


Рис. 2. Система технической эксплуатации в составе системы управления [1]

Как видно из черт. 1. в состав системы технической эксплуатации входят следующие подсистемы:

1) *Подсистема контроля* должна обеспечивать контроль изменения состояния сети и ее компонентов в реальном масштабе времени для выявления и локализации неисправностей с целью их устранения и сквозной контроль.

Подсистема контроля подразделяется на подсистему контроля первичной сети и подсистему контроля вторичной сети общего пользования (ЗК), которое включает сквозной контроль.

2) *Подсистема измерений* должна осуществлять реализацию заданий управления качеством. Подсистема измерений предназначена для эксплуатационных измерений трактов, каналов и аппаратуры связи с целью оценки показателей и параметров используемых технических средств. Измерения проводятся, как правило, в процессе выполнения разных функций технического обслуживания: настройки; паспортизации; проверки работоспособности трактов и технических средств во время их действия; определения причины и места повреждения; ремонта неисправных блоков.

3) *Подсистема возобновления и ремонта* технических средств. При этом подсистема возобновления должна осуществлять управление устранением отказов и обеспечивать работоспособность оборудования, аппаратуры и линий передачи при заданном качестве и надежности с целью предоставления услуг связи с наибольшей эффективностью, уменьшения простоев и оптимального использования средств связи, получения максимальной прибыли при минимальных расходах.

Подсистема ремонта решает задание обеспечения надежной работы сети связи, возобновления ресурса средств связи при снижении стоимости эксплуатационных расходов.

4) *Подсистема резервирования* осуществляет реализацию заданий управления конфигурацией сети или ее составных частей. Подсистема резервирования предназначена для:

- достижения необходимых показателей надежности в случае невозможности или экономической нецелесообразности достижения этих показателей путем повышения надежности отдельных элементов средств связи;

- повышения показателей надежности выделенных служб (услуг) электросвязи;

- получения дополнительной прибыли за счет сокращения длительности простоев трактов и каналов передачи.

5) *Подсистема расчетов* должна осуществлять реализацию заданий управления расчетами и предназначена для проведения расчетно-платежных операций с пользователями за услуги электросвязи, которые предоставляются, со стороны предприятий связи (исполнителей услуг) всех форм собственности.

Основные стандарты TMN

TMN (Telecommunications Management Network) – сеть управления телекоммуникациями. TMN – это по существу международный стандарт, который определяет технологию построения систем управления телекоммуникационными сетями и что определяет все аспекты их функционирования. Следует отметить, что TMN-технология, которая пришла "сверху", то есть она сначала была задумана на бумаге, а уже потом начала реализовываться на практике. Официально рождением TMN можно считать 1988 год, когда МККТТ (в настоящее время МСЕ) опубликовал первую (и основную) рекомендацию М.3010 "Принципы TMN" [1, 2, 3].

В 1992 году до дополнению М.3010 была выпущена целая серия рекомендаций (М.3100, М.3200, М.3300, М.3400 и др.), которые детально описывали основные аспекты TMN, упомянутые в М.3010. Потому 1992 год можно по праву считать годом рождения TMN не только как общей концепции, но как телекоммуникационную технологию. До 2000 года МСЕ выпускал разные дополнительные рекомендации, которые все больше детализировали TMN, вносили разъяснение и поправки к базовым документам, упомянутым выше.

Согласно рекомендациям МСЕ-Т М.3010, TMN является самостоятельной сетью, которая соединена с сетью электросвязи [4, 5]. Архитектура и принципы построения TMN обеспечивают реализацию заданий по управлению, оперативному контролю и эксплуатации разнородного телекоммуникационного оборудования и систем электросвязи, которые изготовлены разными фирмами-производителями [6].

Функции TMN относительно обеспечения надежности функционирования сети

В разработанных рекомендациях сектора телекоммуникаций Международного Союза Электросвязи (МСЕ-Т) в TMN задания системы управления определены из следующих функциональных направлений [4–7]:

- управление конфигурацией сети;
- управление устранением отказов;
- управление качеством;
- управление расчетами;
- управление защитой информации.

В **управлении конфигурацией** решаются задания формирования и развития сети, создания и сопровождение плана нумерации сети, реконфигурация сети и отдельных ее элементов (маршрутизаторов, мультиплексоров, построение карты сети и так далее), планирования услуг, ведения банка данных.

В **управлении устранением отказов** решаются задания контроля за состоянием сети и ее элементов в реальном времени, выявления и локализации повреждений, возобновления трафика, оперативной перестройки сети, устранения повреждений, извещения пользователей о работах, которые

проводятся.

Выявление повреждений в идеологии TMN является неотъемлемым процессом от процесса предоставления услуг по управлению телекоммуникационной сетью [4, 5]. Требуется постоянное или периодическое предоставление услуг по анализу телекоммуникационной сети и состояния ее работы. При этом под выявлением повреждений понимается как выявление проблем связанных с логическим уровнем функционирования – ошибки передачи в следствие коллизий, так и выявление проблем в следствие физического разрушения среды передачи информации.

В **управлении качеством** решенные задания сбору и анализа статистических данных по функционированию сетей и их элементов, регулированию трафика, расширению диапазона услуг связи, а также задание разработки, вывода и контроля за выполнение соглашений об уровне качества оказанных услуг.

В **управлении расчетами** решаются задания сбора данных по средствам, которые предоставляются, и услугам связи, разработки тарифов за средства, которые предоставляются, и услуги, проведение взаимозачетов между участниками предоставления услуг, технических расчетов, которые касаются возможностей сетей, регистрации и учета абонентов.

В **управлении защитой информации** (безопасностью связи) решаются задания разработки мэров по обеспечению закрытости информации и контроля за их осуществлением, защиты баз данных от злоумышленного доступа, мэров технической безопасности и охраны объектов связи, складывания отчетов о попытках несанкционированного доступа к услугам, защите целостности и сохранению данных.

Архитектура TMN владеет рядом характеристик, которые отличают ее от основных конкурентов, SNMP-продуктов и фирменных систем управления, основанных на частных стандартах. Наиболее значимыми из них являются:

- возможность интеграции разнородных сетей за счет комплексной стандартизации большого числа аспектов поведения и структуры системы управления, а также через международный характер стандартов TMN;
- высокая степень масштабируемости решений благодаря наличию соответствующих свойств базового протокола взаимодействия агентов и менеджеров – протокола CMIP;
- наличие в архитектуре специальных элементов для построения больших распределенных систем: промежуточной сети передачи данных, средств маршрутизации и фильтрации сообщений между многочисленными менеджерами и агентами, центральной справочной базы данных, которая хранит информацию об их свойствах и местоположениях и тому подобное;
- защищенность управления с помощью использования открытых стандартов безопасности ISO/OSI.

Нерешенные вопросы применения TMN на практике

Недостатки в применении TMN и нерешенные задачи обеспечения технической эффективности линий связи. К основным недостаткам TMN можно отнести следующие:

- Технология TMN берет свое начало из теории, а не из практики.
- Технология TMN из технической точки зрения не проработала настолько, чтобы считаться законченной стандартизированной технологией, которую можно было бы реализовать на практике в виде конкретной завершенной системы.
- Существует более-менее стандартизированная адаптация TMN до применения на транспортных сетях SDH и сетях абонентского доступа ISDN (рекомендаций серии G и M). Однако для других важных телекоммуникационных технологий (например, сети IP) детализированная адаптация TMN отсутствует.
- Рекомендации, которые в своей совокупности должны давать полное представление о TMN, имеют достаточно сложный для правильной интерпретации формальный язык описания с большим количеством перекрестных ссылок, которое затрудняет как чтение, так и изучение рекомендаций.
- Все рекомендации, которые имеют отношение к TMN, достаточно сложно поданы и организованы в блоки и серии. Большая разбросанность и фрагментарность информации делают их тяжелыми для понимания.
- Техническое воплощение основных правил TMN регламентируется целыми наборами рекомендаций, которые не локализованы в серии M и были разработаны в разные годы разными группами специалистов. Соединить данные рекомендации в единственное "смысловое поле" достаточно сложно, в виду того, что основные цели, степень детализации и направленность отдельных рекомендаций далеко не всегда отвечает проблематике создания систем управления телекоммуникациями.
- В рекомендациях MCE проблема управления телекоммуникационными сетями с точки зрения реальных операторов, производителей и потребителей освещена настолько абстрактно и настолько не отвечает современным реалиям, что много технологических решений, определенных такой абстракцией, оказываются просто невостребованными и ненужными.
- Многими экспертами реализация TMN -интерфейсов рассматривается неоправданно сложным и дорогим делом. Считается, что протокольные стеки, регламентированные для Q-интерфейса, являются очень "перегруженными" и "тяжелыми". Также считается, что верхние ровные модели OSI для данных протокольных стеков стандартизованы достаточно слабо, является достаточно абстрактными, и кроме того сильно усложнены по структуре и методам взаимодействия. Такая ситуация приводит к неоднозначности

інтерпретації інтерфейсів різними розробниками. Чрезмерна складність відображається на надійності і ціні програмного забезпечення.

- Наявність нових, більш рентабельних, більш надійних і, що дуже важливо, популярних комерційних технологій, які надають нові засоби реалізації інтерфейсів, однозначно послаблюють позиції TMN.

- Ощутимо медленне розвиток, зміна і деталізація TMN відповідно до змінами, які відбуваються в області комп'ютерної і телекомунікаційної індустрії.

Література

1. Основи управління зв'язом Російської Федерації / Булгак В.Б., Варакин Л.Е., Крупнов А.Е. і др. ; под. Ред. А.Е. Крупнова і Л.Е. Варакина. – М.: Радио і зв'язь, 1998. – 184 с.
2. Телекомунікаційні системи і мережі. Том 1. Сучасні технології. – М. : Горюча лінія – Телеком, 2003. – 647 с.
3. Теорія мереж зв'язу ; под редакцією В.Н. Рогінського. – М. : Радио і зв'язь, 1981. – 192 с.
4. Дымарский Я.С. Управління мережами зв'язу: принципи, протоколи, прикладні задачі / Дымарский Я.С., Крутякова Н.П., Яновский Г.Г. – М. : ИТЦ «Мобільні комунікації», 2003. – 384 с. – (Серія видань «Зв'яз і бізнес»).
5. Гребешков А.Ю. Стандарти і технології управління мережами зв'язу / Гребешков А.Ю. – М. : Экотрендз, 2003. – 288 с.
6. Контроль якості в телекомунікаціях і зв'язу. Частина II / [Засецкий А.В., Иванов А.Б., Постников С.Д., Соколов И.В.] ; под. ред. А.Б. Иванова. – М. : Компанія САЙРУС СИСТЕМС, 2001. – 342 с.
7. Van Landegem T., De Prycker M., Vandem Brande F. 2005: A Vision of the Network of the Future. Electrical Communication. 1994. 3 rd Quarter. P. 231–240.

References

1. Osnovy upravleniya svyazyu Rossijskoj Federacii / Bulgak V.B., Varakin L.E., Krupnov A.E. i dr. ; pod. Red. A.E. Krupnova i L.E. Varakina. – M.: Radio i svyaz, 1998. – 184 s.
2. Telekommunikacionnye sistemy i seti. Tom 1. Sovremennye tehnologii. – M. : Goryachaya liniya – Telekom, 2003. – 647 s.
3. Teoriya setej svyazi ; pod redakciej V.N. Roginskogo. – M. : Radio i svyaz, 1981. – 192 s.
4. Dymarskij Ya.S. Upravlenie setyami svyazi: principy, protokoly, prikladnye zadachi / Dymarskij Ya.S., Krutyakova N.P., Yanovskij G.G. – M. : ITC «Mobilnye kommunikacii», 2003. – 384 s. – (Seriya izdanij «Svyaz i biznes»).
5. Grebeshkov A.Yu. Standarty i tehnologii upravleniya setyami svyazi / Grebeshkov A.Yu. – M. : Ekotrendz, 2003. – 288 s.
6. Kontrol kachestva v telekommunikacijah i svyazi. Chast II / [Zaseckij A.V., Ivanov A.B., Postnikov S.D., Sokolov I.V.] ; pod. red. A.B. Ivanova. – M. : Kompaniya SAJRUS SISTEMS, 2001. – 342 s.
7. Van Landegem T., De Prycker M., Vandem Brande F. 2005: A Vision of the Network of the Future. Electrical Communication. 1994. 3 rd Quarter. P. 231–240.

Рецензія/Peer review : 20.5.2019 р.

Надрукована/Printed : 5.6.2019 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Полікарівських О.І.

DOI 10.31891/2307-5732-2019-273-3-220-225
 УДК 621.316.1

М.Й. БУРБЕЛО, Ю.В. ЛОБОДА, О.В. СТЕПУРА
 Вінницький національний технічний університет

**АНАЛІЗ ДИНАМІЧНИХ ПОМИЛОК РОЗПОДІЛЬНИХ СТАТКОМ, ЩО
 ЗУМОВЛЕНІ НЕТОЧНІСТЮ ФОРМУВАННЯ ЗАДАВАЛЬНИХ СТРУМІВ**

В статті проаналізовано динамічні помилки симетрування навантажень та фільтрування вищих гармонік за допомогою СТАТКОМ, що зумовлені неточністю формування задавальних струмів.

Ключові слова: симетрування навантажень, фільтрування гармонік.

M.J. BURBELO, Y.V. LOBODA, O.V. STEPURA
 Vinnytsia National Technical University

**ANALYSIS OF DYNAMIC ERRORS OF DISTRIBUTIONAL FITTING, MADE BY INSUFFICIENCY OF FORMING
 DETENTION CURRENCIES**

In the article the algorithm of control of static synchronous compensators is analysed which is based on the theory of instantaneous capacities on dynamic errors. The structural scheme of control systems based on the theory of instantaneous power, the mathematical division of the transition mode for increasing and reducing the asymmetric active-inductive nonlinear load is shown, and the response of the device to this mode is shown. Dynamic errors of load balancing and filtering of higher harmonics are shown with the help of static synchronous compensators, which are caused by inaccuracy of the formation of presumptive currents. From the analysis of dependencies, it follows that the current of the zero sequence is compensated for precisely, and the current of the reverse sequence of the fundamental harmonic, as well as the currents of the direct and reciprocal sequences of the higher harmonics, are compensated by errors which depend on the speed of the load change. Graphs of required consumption for small loads and generation at high loads of active and reactive power during load balancing and filtering of higher harmonics are shown. Dynamic errors of load balancing and filtering of higher harmonics by means of static synchronous compensators, in case of fixation of active and reactive capacities of static synchronous compensators, there are no errors.

Keywords: load balancing, harmonic filtering.

Постановка проблеми

При дослідженні режиму роботи статичного синхронного компенсатора, такого як збільшення та зменшення несиметричного активно-індуктивного нелінійного навантаження, виникають помилки його роботи, що зумовлені неточністю формування задавальних струмів.

Аналіз останніх джерел

Одним із методів керування розподільними СТАТКОМ є метод, що оснований на теорії миттєвої потужності [1–9]. Структурну схему систем керування на основі теорії миттєвої потужності зображено на рис. 1.

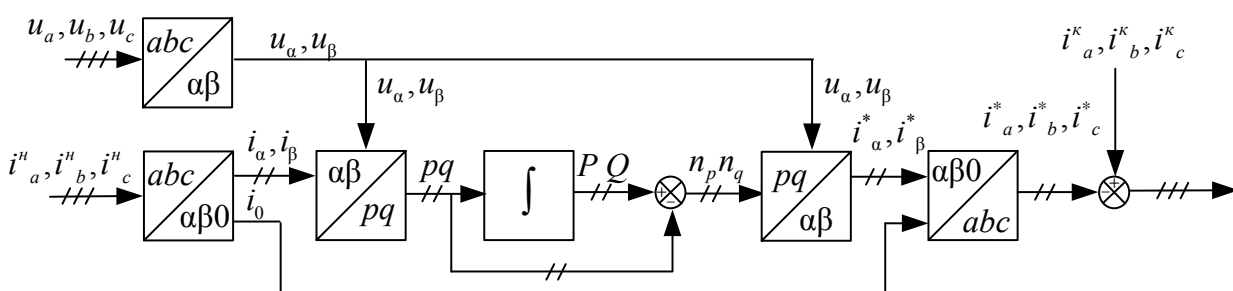


Рис. 1. Система керування на основі теорії миттєвої потужності

Алгоритм керування з використанням теорії миттєвих потужностей складається з таких кроків.

1. Перехід від фазних координат до ортогональних складників напруг і струмів в системі $\alpha\beta$ -координат:

$$\begin{bmatrix} u_{\alpha}(t) \\ u_{\beta}(t) \\ u_0(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{2/3} & -\sqrt{1/6} & -\sqrt{1/6} \\ 0 & \sqrt{1/2} & -\sqrt{1/2} \\ \sqrt{1/3} & \sqrt{1/3} & \sqrt{1/3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a(t) \\ u_b(t) \\ u_c(t) \end{bmatrix}; \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha}(t) \\ i_{\beta}(t) \\ i_0(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{2/3} & -\sqrt{1/6} & -\sqrt{1/6} \\ 0 & \sqrt{1/2} & -\sqrt{1/2} \\ \sqrt{1/3} & \sqrt{1/3} & \sqrt{1/3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix},$$

де $[u_{\alpha}(t), u_{\beta}(t), u_0(t)]^T$, $[i_{\alpha}(t), i_{\beta}(t), i_0(t)]^T$ – вектори напруг і струмів в системі $\alpha\beta 0$ -координат;
 $[u_a(t), u_b(t), u_c(t)]^T$, $[i_a(t), i_b(t), i_c(t)]^T$ – вектори миттєвих фазних напруг і струмів;

$\begin{bmatrix} \sqrt{2/3} & -\sqrt{1/6} & -\sqrt{1/6} \\ 0 & \sqrt{1/2} & -\sqrt{1/2} \\ \sqrt{1/3} & \sqrt{1/3} & \sqrt{1/3} \end{bmatrix}$ – унітарна матриця переходу від фазних до ортогональних координат.

2. Формуванні миттєвих активної та реактивної потужностей:

$$p(t) = i_{\alpha}(t)u_{\alpha}(t) + i_{\beta}(t)u_{\beta}(t); \quad q(t) = i_{\alpha}(t)u_{\beta}(t) - i_{\beta}(t)u_{\alpha}(t). \quad (2)$$

3. Визначення активної та реактивної потужностей навантаження:

$$P(t) = \frac{4}{T} \int_{t-T/2}^t p(t)dt - \frac{1}{T} \int_{t-T}^t p(t)dt; \quad Q(t) = \frac{4}{T} \int_{t-T/2}^t q(t)dt - \frac{1}{T} \int_{t-T}^t q(t)dt. \quad (3)$$

4. Визначення складників потужності пульсацій, які повинен генерувати АФ для симетрування та фільтрування вищих гармонік:

$$n_p(t) = p(t) - P(t); \quad n_q(t) = q(t) - Q(t). \quad (4)$$

5. Знаходження бажаної залежності компенсаційного струму АФ в системі $\alpha\beta$ -координат:

$$i_{\alpha}^*(t) = \frac{n_p(t)u_{\alpha}(t) + n_q(t)u_{\beta}(t)}{u_{\alpha}^2(t) + u_{\beta}^2(t)}; \quad i_{\beta}^*(t) = \frac{-n_q(t)u_{\alpha}(t) + n_p(t)u_{\beta}(t)}{u_{\alpha}^2(t) + u_{\beta}^2(t)}. \quad (5)$$

6. Перехід до системи фазних координат за формулою

$$\begin{bmatrix} i_a^*(t) \\ i_b^*(t) \\ i_c^*(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{2/3} & 0 & \sqrt{1/3} \\ -\sqrt{1/6} & \sqrt{1/2} & \sqrt{1/3} \\ -\sqrt{1/6} & -\sqrt{1/2} & \sqrt{1/3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha}^*(t) \\ i_{\beta}^*(t) \\ i_0^*(t) \end{bmatrix}, \quad (6)$$

де $[i_a^*(t), i_b^*(t), i_c^*(t)]^T$, $[i_{\alpha}^*(t), i_{\beta}^*(t), i_0^*(t)]^T$ – вектори задавальних значень компенсаційних струмів в системі фазних та $\alpha\beta 0$ -координат.

7. Порівняння компенсаційних струмів фаз з фактичними струмами компенсатора та їх регулювання за відхиленням з використанням ПІД-регулятора.

Мета роботи полягає у дослідженні помилок статичного синхронного компенсатора, що зумовлені неточністю формування задавальних струмів, при зміні навантаження.

Виклад основного матеріалу. Аналіз помилок статичного синхронного компенсатора, зумовлених неточністю формування задавальних струмів, проводиться у випадку збільшення та зменшення несиметричного активно-індуктивного нелінійного навантаження (рис. 2).

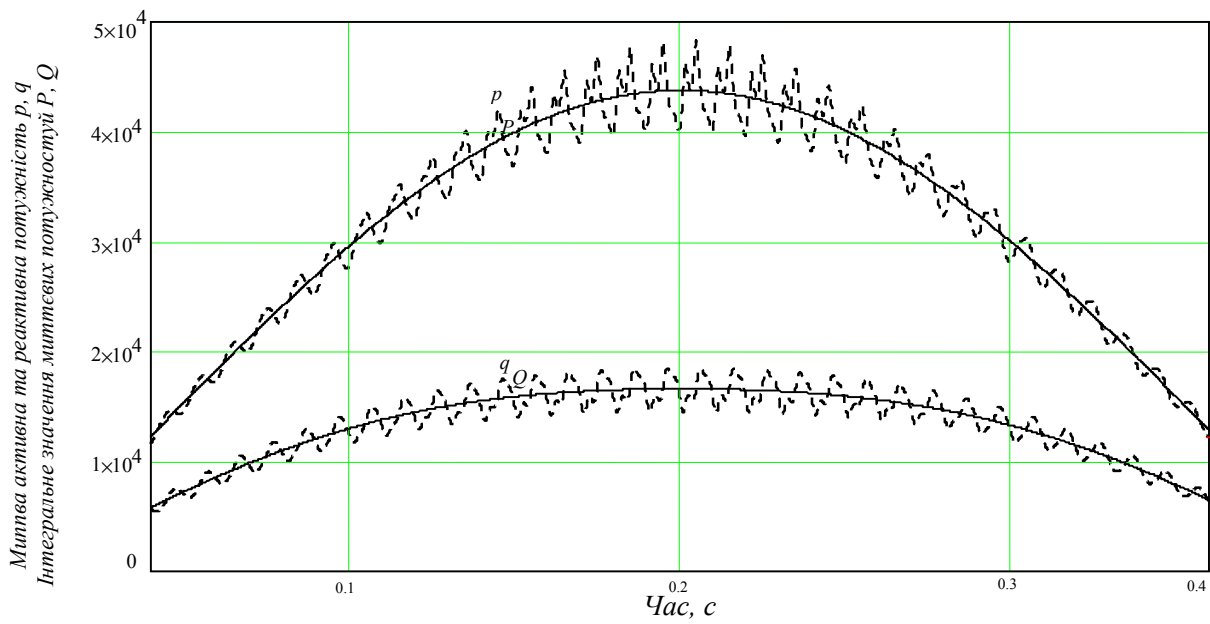


Рис. 2. Часові залежності зміни активної та реактивної потужностей навантаження

Основними показниками ефективності роботи СТАТКОМ є мінімальні значення струмів зворотної та нульової послідовностей основної гармоніки, а також струмів прямої, зворотної та нульової послідовностей вищих гармонік.

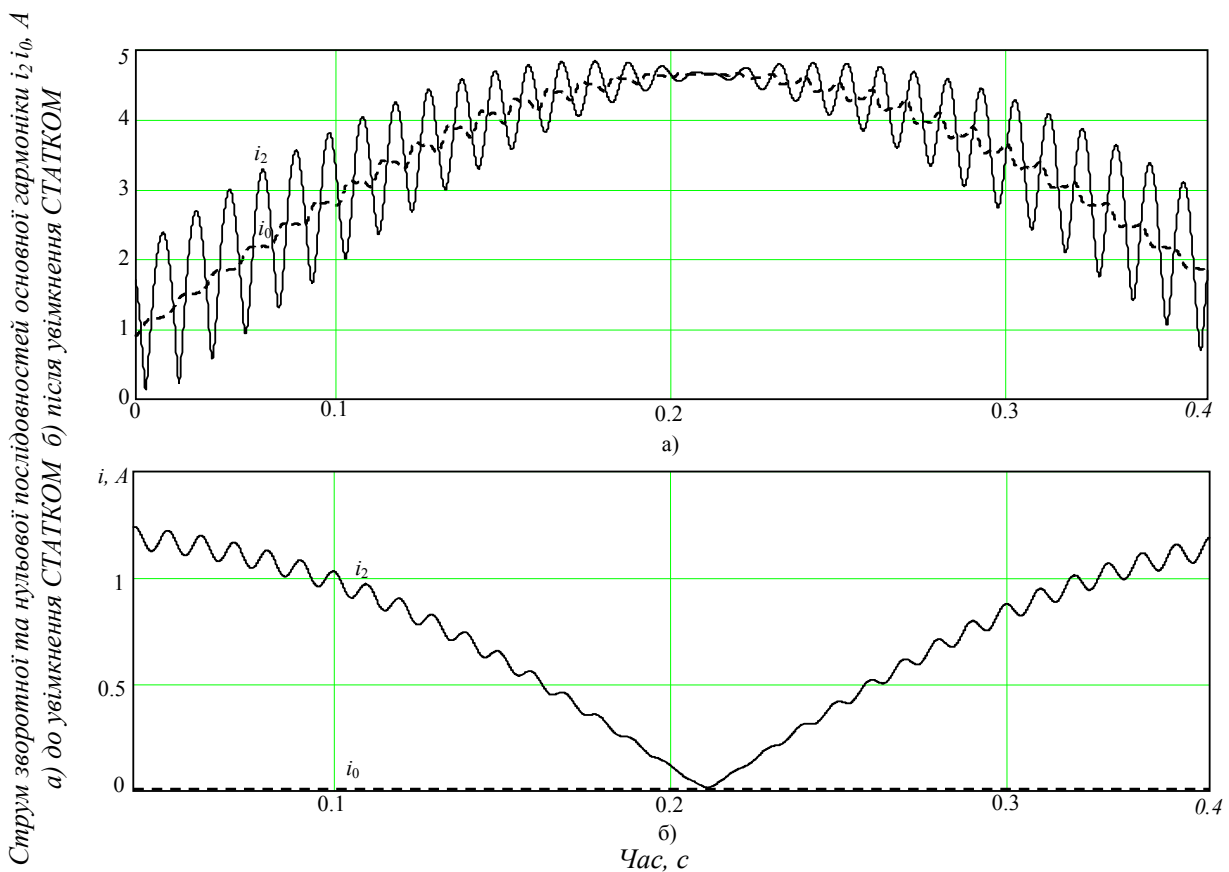


Рис. 3. Залежності струмів зворотної та нульової послідовностей основної гармоніки а) до увімкнення СТАТКОМ б) після увімкнення СТАТКОМ

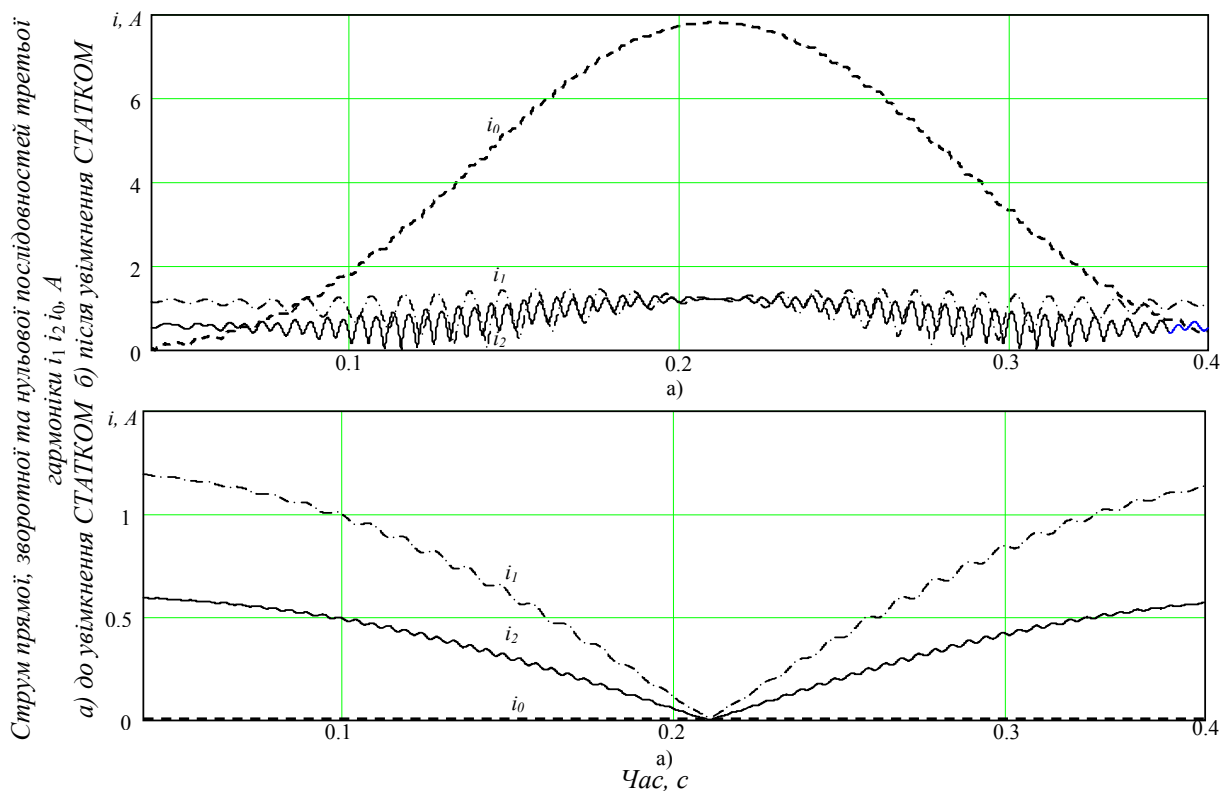


Рис. 4. Залежності струмів прямої, зворотної та нульової послідовностей 3-ї гармоніки а) до увімкнення СТАТКОМ б) після увімкнення СТАТКОМ

На рис. 3 показано залежності струмів зворотної та нульової послідовностей основної гармоніки: а) до увімкнення СТАТКОМ; б) після увімкнення СТАТКОМ, а на рис. 4, ..., рис. 7 – струмів прямої, зворотної та нульової послідовностей, відповідно, 3, 5 і 7 гармонік: а) – до увімкнення СТАТКОМ, б) після увімкнення СТАТКОМ.

З наведених рисунків видно, що помилки симетрування та фільтрування вищих гармонік є досить істотними і залежать від швидкості зміни навантаження. З аналізу залежностей випливає, що струм нульової послідовності компенсується точно, а струм зворотної послідовності основної гармоніки, а також струми прямої та зворотної послідовностей вищих гармонік компенсуються з помилками, які залежать від швидкості зміни навантаження. Причиною помилок є інерційність формування потужностей. Помилки може характеризувати залишковий струм зворотної послідовності (рис. 5).

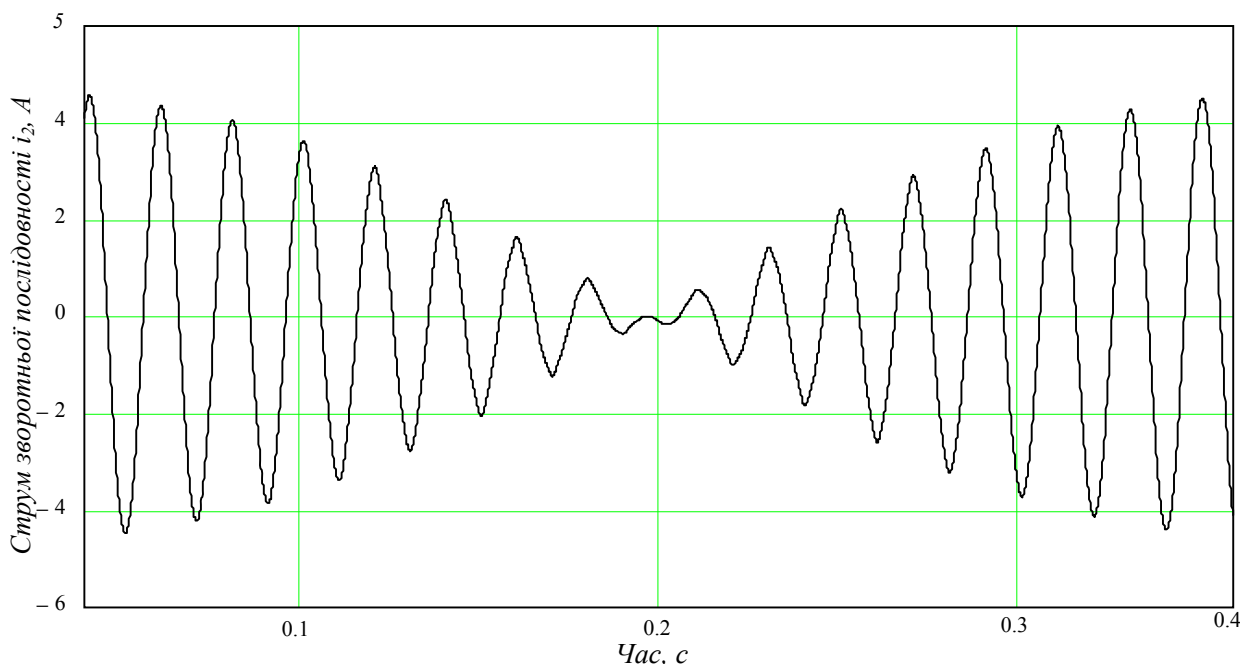


Рис. 5. Залишковий струм зворотної послідовності

Динамічні помилки відсутні у разі фіксування активної та реактивної потужностей на певних середніх значеннях, але при цьому СТАТКОМ повинен генерувати (споживати) активну і реактивну потужності. На рис. 8 показано графіки необхідного споживання за малих навантажень і генерування за великих навантажень активної та реактивної потужностей в процесі кондиціонування якості електроенергії (симетрування навантажень та фільтрування вищих гармонік).

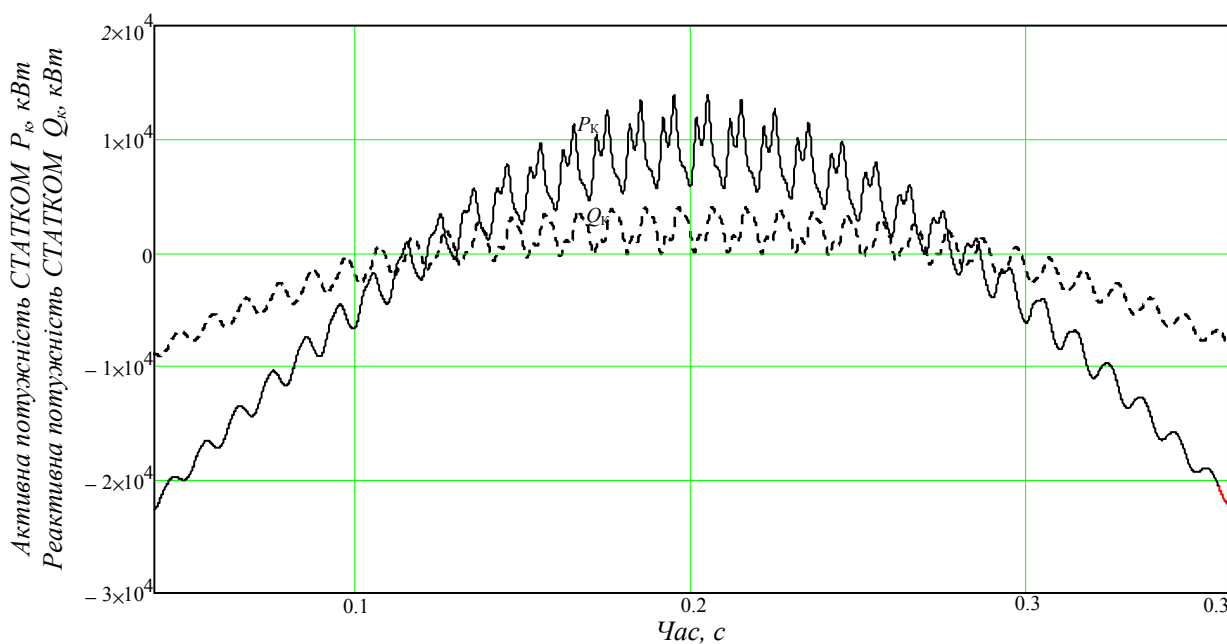


Рис. 6. Залежності споживаних та генерованих потужностей СТАТКОМ у разі фіксування активної та реактивної потужностей

Необхідність споживання та генерування активної та реактивної потужностей в процесі кондиціонування якості електроенергії приводить до необхідності збільшення потужності СТАТКОМ і, відповідно, додаткових матеріальних витрат.

Висновки

Динамічні помилки симетрування навантажень та фільтрування вищих гармонік за допомогою СТАТКОМ залежать від швидкості зміни навантаження. За великих швидкостей збільшення та зменшення навантажень помилки істотні. У разі фіксування активної та реактивної потужностей СТАТКОМ помилки відсутні, однак при цьому СТАТКОМ повинен споживати активну та реактивну потужності за малих навантажень і генерувати – за великих навантажень.

Література

1. Akagi H. Instantaneous power theory and applications to power conditioning / H. Akagi, E. H. Watanabe, M. Aredes. – IEEE Press / Wiley-Interscience, 2007. – 379 p.
2. Gyugyi L. and Strycula E. C. Active AC power filters, Conf. Rec., IEEE IAS, 1976, p. 529–535.
3. Akagi H. Instantaneous Reactive Power Compensator Comprising Switching Devices Without Energy Storage Components / H. Akagi, Y. Kanazawa, and A. Nabae // IEEE Trans. Ind. Appl. – 1984. – Vol. IA-20, No. 3. – P. 625–630.
4. Akagi H., Naba A. & Atoh S. Control strategy of active power filters using multiple voltage-source PWM converters. *IEEE transactions on industry applications*, 1986, Vol. 22, No. 3. P. 460–465.
5. Akagi H., Nabae A. The p - q theory in three - phase systems under non - sinusoidal conditions / H. Akagi, A. Nabae // European Transactions on Electrical Power. – 1993. – Т. 3. – №. 1. – P. 27–31.
6. Akagi H. Trends in Active Power Line Conditioners / H. Akagi // IEEE Trans. on PEELS. – 1994. – Vol. 9, No. 3. – P. 263–268.
7. Ginn III H. L. A Hybrid Reference Signal Generator for Active Compensators // *Electrical Power Quality and Utilization, Journal*. – Vol XIII, No 1, 2007. – P. 51–57.
8. Firlit A. Currents Physical Components Theory and p-q Power Theory in the Control of the Three-phase Shunt Active Power Filter // *Electrical Power Quality and Utilization, Journal*. – 2007. – Vol XIII, No 1. – P. 59–66.
9. Бурлака В. В. Обзор методов управления активными фильтрами / В. В. Бурлака, С. К. Поднебенная, М. Д. Дьяченко // *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. – 2011. – № 1. – С. 51–54.

References

1. Akagi H. Instantaneous power theory and applications to power conditioning / H. Akagi, E. H. Watanabe, M. Aredes. – IEEE Press / Wiley-Interscience, 2007. – 379 p.
2. Gyugyi L. and Strycula E. C. Active AC power filters, Conf. Rec., IEEE IAS, 1976, p. 529–535.
3. Akagi H. Instantaneous Reactive Power Compensator Comprising Switching Devices Without Energy Storage Components / H. Akagi, Y. Kanazawa, and A. Nabae // IEEE Trans. Ind. Appl. – 1984. – Vol. IA-20, No. 3. – P. 625–630.
4. Akagi H., Naba A. & Atoh S. Control strategy of active power filters using multiple voltage-source PWM converters. IEEE transactions on industry applications, 1986, Vol. 22, No. 3. P. 460–465.
5. Akagi H., Nabae A. The p - q theory in three - phase systems under non - sinusoidal conditions / H. Akagi, A. Nabae // European Transactions on Electrical Power. – 1993. – Т. 3. – №. 1. – P. 27–31.
6. Akagi H. Trends in Active Power Line Conditioners / H. Akagi // IEEE Trans. on PELS. – 1994. – Vol. 9, No. 3. – P. 263–268.
7. Ginn III H. L. A Hybrid Reference Signal Generator for Active Compensators // Electrical Power Quality and Utilization, Journal. – Vol XIII, No 1, 2007. – P. 51–57.
8. Firlit A. Currents Physical Components Theory and p-q Power Theory in the Control of the Three-phase Shunt Active Power Filter // Electrical Power Quality and Utilization, Journal. – 2007. – Vol XIII, No 1. – P. 59–66.
9. Burlaka V. V. Obzor metodov upravleniya aktivnymi filtrami / V. V. Burlaka, S. K. Podnebennaya, M. D. Dyachenko // Elektromehanichni i energozberigayuchi sistemi. – 2011. – № 1. – S. 51–54.

Рецензія/Peer review : 17.5.2019 р.

Надрукована/Printed : 3.6.2019 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Кугін В.М.

I.O. КРИВОРУЧКО, С.М. ЗЛЕПКО, Л.Г. КОВАЛЬ, М.І. ПАЛАМАРЧУК
Вінницький національний технічний університет

ПСИХОЛОГІЧНИЙ І ФІЗІОЛОГІЧНИЙ ПРОФІЛІ ОПЕРАТОРА В КОНТЕКСТІ ОЦІНЮВАННЯ ЙОГО ФУНКЦІОНАЛЬНОГО СТАНУ

В статті для оцінювання працездатності оператора в екстремальних умовах було запропоновано підхід, відповідно до якого функціональний стан розглядається як сукупність психологічного і фізіологічного процесів. Представлено алгоритм ефективного тестування для формування психологічного профілю вояка за рівнем когнітивних функцій. Також було показано, що прогнозування функціонального стану вояка як критерію надійної та ефективної професійної діяльності може бути досягнуто тільки застосуванням декількох методик прогнозування, що істотно підвищує його достовірність.

Ключові слова: функціональний стан, психологічний профіль, когнітивні порушення.

I.O. KRIVORUCHKO, S.M. ZLEPKO, L.G. KOVAL, M.I. PALAMARCHUK
Vinnytsia National Technical University

PSYCHOLOGICAL AND PHYSIOLOGICAL PROFILES OF THE OPERATOR IN THE CONTEXT OF EVALUATION OF ITS FUNCTIONAL STATE

The shortage of professional personnel, their poor quality training, lack of motivation and increased psycho-emotional load on servicemen of the Armed Forces of Ukraine led to the urgent solution of the task of ensuring a reliable, adequate functional state of the soldiers of the Armed Forces of Ukraine under extreme conditions. In order to assess the performance of a soldier in extreme conditions, an approach is proposed, according to which, the functional state is considered as a combination of psychological and physiological processes. To date, there is a sufficiently large number of definitions of the "functional state", which creates the appearance of misunderstandings, conflict situations, different sources of origin. If the Functional state is defined as the current ability of a system to perform qualitatively its inherent functions, then for a person, as a biological system, the only final function is life. In this case, the Functional state can be defined as the integral characteristic of the biological activity of the biological object at a given time. In other words, Functional state of biological objects is their current ability to produce life or the current viability. In order to construct a fully adequate psychological profile of a soldier's personality in the course of his activity in extreme conditions, it is necessary to take into account the effect of external and internal stimuli that create the preconditions for psycho-physiological stress. Failure to take into account the factor of influence on the ability of a person to make decisions in case of his mismatch (physiology, intelligence, psyche) can have catastrophic consequences. Forecasting of the functional status of a soldier as a criterion of reliable and effective professional activity can be achieved only by the use of several methods of forecasting, which significantly increases its reliability. At the same time, the lack of methodological and practical approaches to solving the problem necessitates the further improvement of the system for assessing cognitive functions, especially in the state of stress.

Keywords: functional state, psychological profile, cognitive impairment.

Вступ

Оцінювання і контроль функціонального стану людини в процесі виконання ним професійної діяльності, особливо в екстремальних умовах, є однією із актуальних задач розвитку суспільства. Останнім часом, зважаючи на ту техногенну ситуацію, в якій знаходиться Україна, ця задача набула своєї гостроти і невіршеності в Збройних Силах України (ЗСУ).

Постановка проблеми

Дефіцит професійних кадрів, їх неякісна підготовка, відсутність мотивації та підвищене психоемоційне навантаження на військовослужбовців ЗСУ призвели до необхідності термінового розв'язку задачі забезпечення надійного, адекватного функціонального стану вояків ЗСУ в екстремальних умовах. При цьому, функціональний стан ми розглядаємо як невід'ємну складову здоров'я вояка, а значить і його життєздатності і працездатності.

Основний текст

На сьогодні існує достатньо велика кількість визначень «функціонального стану», що створює появу непорозумінь, конфліктних ситуацій, різних джерел походження тощо. Всі вони зумовлені відсутністю загальноприйнятого (а значить і за змістом) терміну «функціональний стан» (ФС), хоча в основі всіх підходів до його визначення лежить один із трьох підходів. Це активаційний підхід, за яким ФС – це фонові активність нервових центрів, при якій реалізується та чи інша діяльність людини (Льїн, 2005; Данилова 1992). Наступним є діяльнісний підхід, згідно з яким, ФС – це система реакцій організму у вигляді інтегрального динамічного комплексу особистісних характеристик тих функцій та якостей індивіду, які прямо або опосередковано зумовлюють виконання діяльності (Медведев, 1970; Зінченко, 1997; Леонова, 1984). І третій – адаптаційний підхід, відповідно до якого, ФС – це інтегральна характеристика напруженості адаптаційних механізмів організму (Баєвський, Берсенєва, 1997).

Якщо визначати ФС як поточну здатність системи якісно виконувати властиві їй функції, то для людини як біологічної системи єдиною кінцевою функцією є життєдіяльність. В такому випадку ФС можна визначати як інтегральну (якісну) характеристику життєдіяльності біологічного об'єкту на даний момент часу [1]. Іншими словами, ФС біологічних об'єктів це їх поточна здатність до продукування життя або поточна життєздатність.

Критерієм якості життєздатності біооб'єкту пропонується вважати адаптаційні можливості,

відповідно до якого, ФС – це інтегральна характеристика поточних адаптаційних можливостей живої системи [2].

Враховуючи те, що всю множину ФС можна поділити на два основних класи (допустимі – дозволені) та (недопустимі – недозволені), сформулюємо додаткові критерії для оцінювання ФС і працездатності людини. Перш за все, це критерій надійності, який характеризує здатність людини виконувати свою діяльність на заданому рівні ефективності (точності, безвідмовності, своєчасності). По-друге, це ціна діяльності, яка визначає фізіологічні і психологічні (енергетичні) витрати на виконання діяльності [1].

Як уже відзначалося, ФС як характеристика поточної можливості якісного виконання властивих системі функцій має градуваний характер, тому кожен з перерахованих допустимих і недопустимих ФС може мати різну вираженість. В цілому всі недопустимі ФС, які відрізняються як за критерієм надійності і ціни діяльності, так і адаптаційних можливостей (життєздатності) організму, можна розташувати на континуумі «надбадьорість – перевтома» між «сильною втомою» і «перевтомою». Під діяльністю при цьому треба розуміти будь-які форми психічної діяльності, а не тільки виробничу, спортивну або навчальну. Зокрема, ефективність поведінки особистості направленої на задоволення біологічних потреб, також є критерієм ФС [1].

Іноді допустимі і недопустимі ФС розглядають як стани, відповідно, адекватної мобілізації і динамічної неузгодженості [Медведев, 1970. 1979]. Стани адекватної мобілізації характеризуються повною відповідністю ступеня напруженості функціональних можливостей людини вимогам, що зумовлені конкретними умовами. Вони можуть порушуватися під впливом різних причин: тривалості діяльності, підвищеної інтенсивності навантаження, накопичення втоми і т.д. Тоді виникають стани динамічної неузгодженості – реакція в цьому випадку неадекватна навантаженню або потрібні психофізіологічні витрати перевищують актуальні можливості людини.

В процесі виконання робіт авторами для поточного використання в якості базового було прийнято визначення ФС, запропоноване Медведевим (1970), для якого характерні такі можливі стани: адекватної мобілізації і динамічної неузгодженості.

Враховуючи також, що загальноприйнятого поняття «екстремального стану» не існує будемо в подальшому використовувати таке: екстремальні стани – це стани організму вояка, які виникають і розвиваються під дією екстремальних факторів і характеризуються надмірною напруженістю або виснаженням механізмів пристосування і суттєвими розладами життєдіяльності.

Для оцінювання працездатності вояка в екстремальних умовах пропонується підхід, відповідно до якого функціональний стан розглядається як сукупність психологічного і фізіологічного процесів.

На рис. 1 представлено алгоритм ефективного тестування для формування психологічного профілю вояка за рівнем когнітивних функцій. В ході розробки алгоритму використано такі позначення: TM_i – i -а тестова методика; M – функція підрахунку результатів; $Id (TM_{BTM_i})$ – ідентифікатор питання тесту; $ANSW_i$ – відповідь на i -е запитання; OPB_i – оцінка відповіді; W_i – i -й тест; A – набір логічних правил для формування траєкторії тестування; T – набір бальних оцінок параметра, що характеризує стан когнітивної функції; P – профіль кандидата.

Результатом оцінювання стає рівень когнітивних порушень-критерій, який вводиться і використовується для оцінювання функцій психологічного профілю особистості вояка.

Оцінювання рівня когнітивних порушень виконується за двома інформативними складовими: інтелектуальною і фізіологічною (а також, за необхідності, і їх комплексом).

Інтегральний показник фізіологічної складової рівня когнітивних порушень визначається за:

а) адаптаційним потенціалом $АП_B (P. M. Баєвський)$ [3]

$$АП_B = 0,011 * ЧСС + 0,014 * АТ_C + 0,008 * АТ_P + 0,014 * B + 0,009 * МТ - 0,009 * ДТ - 0,273, \quad (1)$$

де $ЧСС$ – частота серцевих скорочень, $АТ_C$; $АТ_D$ – систолічний та діастолічний тиск, B – вік, $МТ$ – маса тіла, $ДТ$ – довжина тіла;

б) рівнем фізичного стану $РФС$ (Е. А. Пирогова) [4]

$$РФС = (700 - 3 * ЧСС - 2,5 * АТ_{CP} - 2,7 * B + 0,2 * МТ) / (350 - 2,6 * B + 0,21 * ДТ), \quad (2)$$

де $АТ_{CP} = АТ_D + (АТ_C - АТ_D) / 3$ середній артеріальний тиск;

в) індексом стабільності I_{CT} ЧСС [4]

$$I_{CT} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \ln\left(\frac{1}{P(x_j)}\right), \quad (3)$$

де n – кількість врахованих змінних стану, $P(x_j)$ – ймовірність відхилення значення змінної x_j від норми.

Для норми фізіологічної складової x_j

$$P(x_j) = P\left(|x_j - \bar{x}_j| < \delta\right), \quad (4)$$

де \bar{x}_j – середнє значення змінної x_j за час дослідження, δ – величина допустимого відхилення від норми.



Рис. 1. Алгоритм адаптивного тестування для формування психологічного профілю вояка за рівнем когнітивних функцій

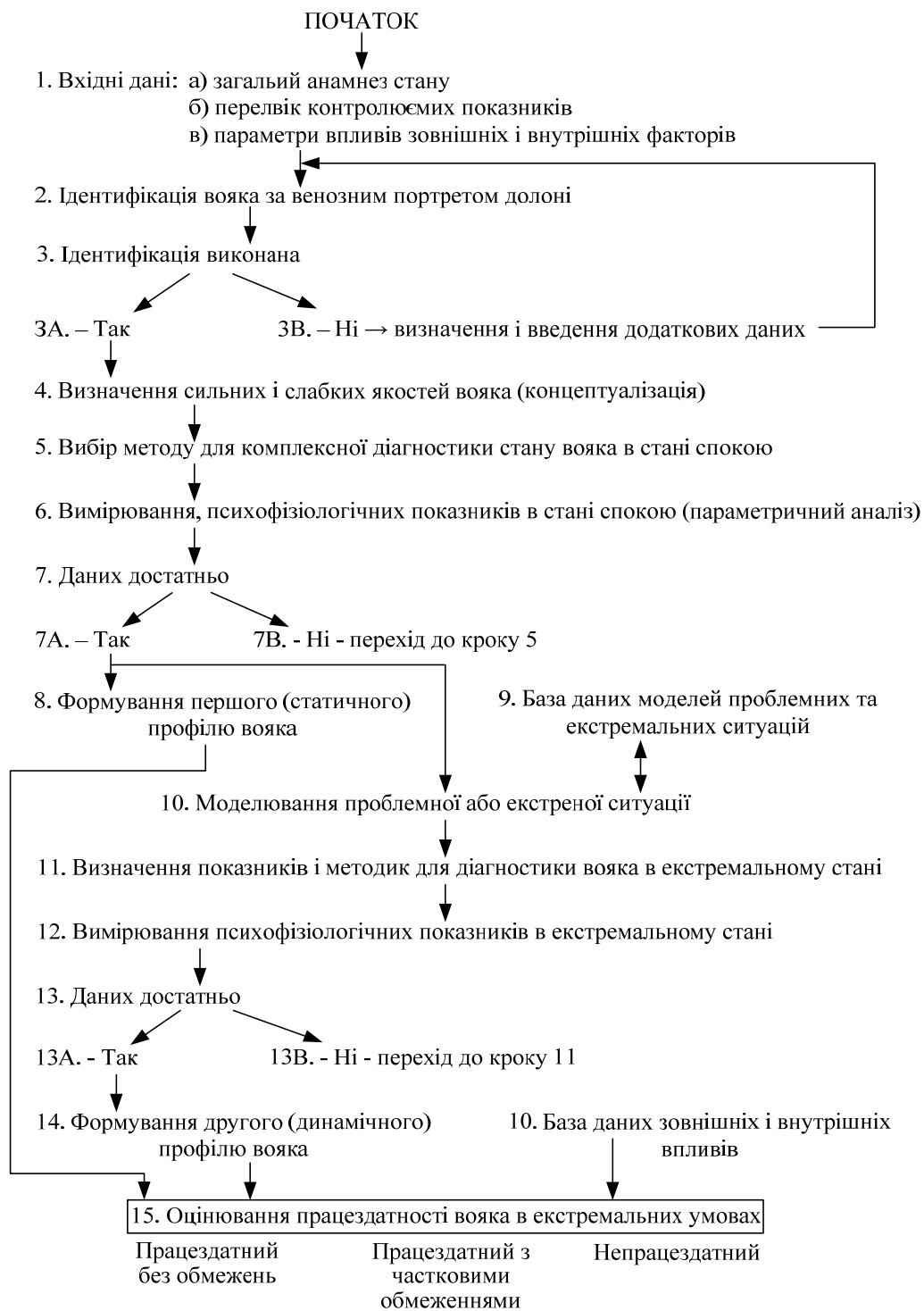


Рис. 2. Структура методу оцінювання працездатності вояка в екстремальних умовах

Для отримання інтегрального показника рівня порушень фізіологічної складової використано коефіцієнти:
адаптації

$$K_{ad} = \frac{AP_B}{AP_B^H}, \tag{5}$$

стану

$$K_C = \frac{P\Phi C}{P\Phi C^H}, \tag{6}$$

стабільності

$$K_{CT} = \frac{I_{CT}}{I_{CT}^H}, \tag{7}$$

де AP_B^H , RF_C^H , I_{CT}^H – належні (нормовані) значення (норми) відповідних індексів і критеріїв. Належне значення показника (індексу, критерія) – це його величина в умовах фізіологічного спокою (10 хвилин лежачи після будь-якої діяльності), яка розрахована з урахуванням довжини і маси тіла, статі і віку людини. Вибір даних індексів і критеріїв, як найбільш інформативних, зумовлений тим, що вони враховують основні фізіологічні ознаки стресу.

Тоді вираз інтегрального показника фізіологічної складової когнітивних порушень набирає вигляду $P_{физ} = (K_{ad} + K_C + K_{CT})/3$ і має нормований діапазон значень $0 \div 1$.

Інтегральний показник психологічної складової рівня когнітивних порушень, включає в себе оцінки за тестами: «5 слів», «Чорно-білі таблиці Шульте», «Пам'ять на числа», «Пам'ять на образи», «Коректурна проба» та методиками «Малюнки Поппельрейтера», «Годинник», «Латентна проста зоровомоторна реакція» [5÷10].

Норми і нормовані значення показників інтелекту наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Інтегральні показники когнітивної інтелектуальної сфери

№ п/п	Позначення коефіцієнта	Назва тесту	Показник або критерій та його значення	Нормування значення показника або критерію
1	2	3	4	5
1	T_C	«Пам'ять на числа»	Запам'ятовування чисел норма: $\frac{7}{12} \div \frac{12}{12} = 0,58 \div 1$	$\begin{cases} 1 \text{ при } T_C = 6 \div 10 \\ 0 \text{ при } T_C < 6 \end{cases}$
2	T_O	«Пам'ять на образи»	Запам'ятовування образів норма: $\frac{6}{12} \div \frac{16}{16} = 0,38 \div 1$	$\begin{cases} 1 \text{ при } T_O = 4 \div 10 \\ 0 \text{ при } T_O < 4 \end{cases}$
3	T_{el}	«5 слів»	Запам'ятовування слів норма: $\frac{9}{10} \div \frac{10}{10} = 0,9 \div 1$ при $< 0,9$ – деменція	$\begin{cases} 1 \text{ при } T_{el} = 9 \div 10 \\ 0 \text{ при } T_{el} < 9 \end{cases}$
4	$T_{Ш}$	Таблиці «Шульте»	Ступінь опрацювання норма: $0 \div 1$	$\begin{cases} 1 \text{ при } T_{Ш} = 0 \div 10 \\ 0 \text{ при } T_{Ш} < 10 \end{cases}$
5	$T_{КП}$	Тест «Коректурна проба»	Проглянутих букв норма: $\frac{1601}{2000} \div \frac{2000}{2000} = 0,8 \div 1$	$\begin{cases} 1 \text{ при } T_{КП} = 8 \div 10 \\ 0 \text{ при } T_{КП} > 8 \end{cases}$
6	$T_{П}$	Малюнки Поппельрейтера	Знайдених малюнків норма: $\frac{20}{2000} \div \frac{41}{2000} = 0,01 \div 0,7$	$\begin{cases} 1 \text{ при } T_{П} = 1 \div 7 \\ 0 \text{ при } T_{П} < 7 \end{cases}$
7	M_G	Методика «Годинник»	Правильно вказаних годин норма: $\frac{13}{42} \div \frac{42}{42} = 0,3 \div 1$	$\begin{cases} 1 \text{ при } M_G = 3 \div 10 \\ 0 \text{ при } M_G > 3 \end{cases}$
8	$ЛППЗМР$	Методика «Латентної простої зоровомоторної реакції»	Психомоторна реакція норма: $5 \div 10$	$\begin{cases} 1 \text{ при } M_G = 5 \div 10 \\ 0 \text{ при } M_G > 5 \end{cases}$

Висновки

Для побудови повністю адекватного психологічного профілю особистості вояка під час його діяльності в екстремальних умовах необхідно враховувати дію зовнішніх і внутрішніх збуджень, які створюють передумови психофізіологічного стресу. Невраховування фактору впливу на спроможність людини приймати рішення при його невідповідності (фізіології, інтелекту, психіки) може мати катастрофічні наслідки.

Прогнозування функціонального стану вояка як критерію надійної та ефективної професійної діяльності може бути досягнуто тільки застосуванням декількох методик прогнозування, що істотно підвищує його достовірність. Разом з тим відсутність методологічних і практичних підходів до вирішення

проблеми зумовлює необхідність подальшого вдосконалення системи оцінювання когнітивних функцій, особливо в стані стресу.

Література

1. Зараковский Г.М. Диагностика функциональных состояний / Г.М. Зараковский, Б.А. Королев, В.И. Медведев. – СПб : Питер, 2000. – С. 121–129.
2. Маришук В.Л. Методы оценки функциональных состояний и работоспособности / В.Л. Маришук. – СПб : Питер, 2000. – С. 105–109.
3. Баевский Р.М. Прогнозирование состояний на грани нормы и патологии / Баевский Р.М. – М. : 1979. – 295 с.
4. Пирогова Е.А. Совершенствование физического состояния человека / Е.А. Пирогова. – К. : Здоров'я, 1986. – 192 с.
5. Методика «Память на образы» [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.psyoffice.ru/3-0-praktikum-pamobr.htm>
6. Методика «Память на числа» [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://psylist.net/praktikum/pamcis.htm>
7. Таблицы Шульте [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://4brain.ru/skorochtenie/_tablicy-shulte.php
8. Тест "Корректирующая проба" (Оценка устойчивости внимания) [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.vashpsixolog.ru/psychodiagnostic-school-psychologist/61-diagnosis-of-intellectual-development/478-test-proofreading-test-score-sustainability-focus>
9. Проба В. Пoppelрейтера [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://studopedia.ru/15_99689_proba-v-poppelreytera.html
10. Рисунковий тест «Годинник» [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://nebo.at.ua/publ/psikhologichni_testi/risunkovij_test_godinnik_diznajtesja_riven_svoeji_zhittevoji_energiji/41-1-0-507

References

1. Zarakovskij G.M. Diagnostika funkcionalnyh sostoyanij / G.M. Zarakovskij, B.A. Korolev, V.I. Medvedev. – SPb : Piter, 2000. – S. 121–129.
2. Marishuk V.L. Metody ocenki funkcionalnyh sostoyanij i rabotosposobnosti / V.L. Marishuk. – SPb : Piter, 2000. – S. 105–109.
3. Baevskij R.M. Prognozirovanie sostoyanij na grani normy i patologii / Baevskij R.M. – M. : 1979. – 295 s.
4. Pirogova E.A. Sovershenstvovanie fizicheskogo sostoyaniya cheloveka / E.A. Pirogova. – K. : Zdorov'ya, 1986. – 192 s.
5. Metodika «Pamyat na obrazy» [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu : <https://www.psyoffice.ru/3-0-praktikum-pamobr.htm>
6. Metodika «Pamyat na chisla» [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu : <http://psylist.net/praktikum/pamcis.htm>
7. Tablicy Shulte [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu : https://4brain.ru/skorochtenie/_tablicy-shulte.php
8. Test "Korrekturnaya proba" (Ocenka ustojchivosti vnimaniya) [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu : <http://www.vashpsixolog.ru/psychodiagnostic-school-psychologist/61-diagnosis-of-intellectual-development/478-test-proofreading-test-score-sustainability-focus>
9. Proba V. Poppelreytera [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu : http://studopedia.ru/15_99689_proba-v-poppelreytera.html
10. Risunkovij test «Godinnik» [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu : http://nebo.at.ua/publ/psikhologichni_testi/risunkovij_test_godinnik_diznajtesja_riven_svoeji_zhittevoji_energiji/41-1-0-507

Рецензія/Peer review : 9.5.2019 р. Надрукована/Printed : 3.6.2019 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Кичак В.М.

МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН

У цій статті розглядається питання методів розрахунку теплопровідності електричних машин з використанням нового пористого матеріалу. Представлена спрощена модель структури і тепловий опір основних елементів електричних машин. Результат розрахунку перевіряються плоскою моделлю двошаровою теплопровідністю, яка заснована на експериментах і електромагнітному моделюванні. Моделі теплового стану отримані за допомогою паралельних методів і класичним методом оцінки.

Ключові слова: електрична машина, електродвигун, діагностика, методи теплового контролю, нейронні мережі.

D.U. ZUBENKO, O.M. PETRENKO, V.V. LINKOV

O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv

METHODS OF CALCULATION OF HEAT CONDUCTIVITY OF ELECTRICAL MACHINES

In this paper, Metal examines the question of methods for calculating the thermal conductivity of electric machines. A simplified model of structure and thermal resistance of the main elements of electric machines is presented. The result of the calculation is verified by a flat model of two-layer heat conductivity, which is based on experiments and electromagnetic modelling. Models of the thermal state are obtained using parallel methods and the classical method of evaluation. For such requirements, more accurate thermal models are needed that integrate the thermal properties of the material (electrical insulating and magnetic materials) to accurately imagine the behaviour of the system. For such requirements, more accurate thermal models are needed that integrate the thermal properties of the material (electrical insulating and magnetic materials) to accurately imagine the behaviour of the system. In a thermal study, one of the main problems of electric machines is their materials, of which it is the most vulnerable component, such as insulating materials. Winding of electric machines can be damaged or reduce the service life if the heat limit for the material is exceeded. However, as the slots are filled with composite materials, such a real slot model is difficult to install. The prediction of the thermal conductivity (PFC) using a number of tools, such as the finite element method (ICE), will result in excessive simulation time. Excitation winding where the side of electric machines is usually hidden in a closed room using an epoxy resin (mainly in special linear motors) or varnish (mainly in rotary engines), copper conductors are isolated from each other. Moreover, the enamel wire outside the copper conductor, the insulating paper slot is filled to increase the insulation. Also, different from porous materials, the component of metal and gas in porous materials may be replaced by equivalent insulation and copper wires, respectively. In addition, there is no fluid in the thermal transfer between them, porosity can not be replaced by a wire without isolation. Therefore, the actual task of developing a mathematical model of thermal conductivity in electric machines with different types of insulation.

Key words: electric machine, electric motor, diagnostics, methods of thermal control, neural networks.

Вступ

Існує зростаюча потреба в мініатюризації, енергетичній ефективності, зниженні витрат, а також використанні нових технологій і матеріалів для електричних машин. Для таких вимог потрібні більш точні теплові моделі, що інтегрують теплові властивості матеріалу (електричні ізоляційні і магнітні матеріали) для достовірної уяви поведінки системи [1–3]. В тепловому дослідженні одна з головних проблем електричних машин – їх матеріали, з найбільш вразливим таким компонентом, як ізоляційні матеріали. Обмотки електричних машин можуть бути пошкоджені або можуть зменшити термін служби, якщо тепла межа для матеріалу перевершена [1]. Однак, як слоти заповнені композитними матеріалами, то таку реальну модель слотів важко встановити. Прогнозування коефіцієнта теплопровідності (ПКТ) за допомогою численних інструментів, таких як метод кінцевих елементів (МКЕ), призведе до надмірного часу моделювання [4–6].

Обмотки збудження, де сторона електричних машин, як правило, схована в закриті приміщення за допомогою епоксидної смоли (в основному в спеціальних лінійних двигунах) або просочення лаком (в основному в роторних двигунах), мідні провідники ізолювані один від одного. Більш того, провід емалі зовні мідного провідника, слот із ізоляційного паперу заповнені, щоб збільшити ізоляцію. Також, відрізняючись від пористих матеріалів, компоненти металу і газу в пористих матеріалах можливо замінені еквівалентною ізоляцією і мідними проводами, відповідно. Крім того, не існує будь-якої рідини термічного переносу між ними, пористість не може бути замінена на дріт без ізоляції [4, 8]. Тому актуальна задача розробки математичної моделі теплопровідності в електричних машинах з різними видами ізоляції.

Експериментальна частина

Тепловий опір можна обчислити за такими формулами:

$$R_1 = \frac{L_p}{\frac{L_p - D}{2} L_p \cdot \lambda_{ex}} = \frac{1}{\frac{L_p - D}{2} \cdot \lambda_{ex}}, \quad (1)$$

$$R_2 = \frac{\frac{L_p - D}{2}}{D \cdot L_p \cdot \lambda_{ex}} = \frac{L_p - D}{2D \cdot L_p \cdot \lambda_{ex}}, \quad (2)$$

$$R_3 = \frac{D}{D \cdot L_p \cdot \lambda_{cu}}, \quad (3)$$

де λ_{ex} – еквівалентний ПКТ ізоляційних матеріалів, λ_{cu} – провідність мідного провідника

Згідно з тепловою мережею, еквівалентний тепловий опір блоку цілих клітин може бути отримано наступним чином [7–9]:

$$R_{eq1} = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{2R_2 + R_3} \right)^{-1}, \quad (4)$$

$$\lambda_{eq1} = \frac{2}{R_1} + \frac{1}{2R_2 + R_3} \cdot L_p. \quad (5)$$

Таким чином, еквівалентна ПКТ елементарної комірки є:

$$\lambda_{eq1} = \frac{\lambda_{ex} \cdot (L_p - D)}{L_p} + \frac{D \cdot L_p \cdot \lambda_{ex} \cdot \lambda_{cu}}{\left[\lambda_{cu} \cdot (L_p - D) + D \cdot \lambda_{ex} \right] \cdot L_p} \quad (6)$$

Підставивши формули (2)–(6), що еквівалентно ПКТ всього слота, можна отримати:

$$\varphi = \frac{V_p}{V\alpha} = \frac{V_p}{V_s + V_p}. \quad (7)$$

Подібно визначенням пористості матеріалу, визначення в слоті може бути виражено для голого дроту як коефіцієнт заповнення слота [9–13].

Визначення пористості:

$$\varepsilon = \frac{D^2 \cdot L_p}{L_p^3} = \frac{D^2}{L_p^2} \quad (8)$$

$$\lambda_{eq1} = \lambda_{ex} \left(1 - \sqrt[3]{\varepsilon} \right) + \frac{\sqrt[3]{\varepsilon} \cdot \lambda_{ex} \cdot \lambda_{cu}}{\lambda_{cu} + (\lambda_{ex} - \lambda_{cu}) \sqrt[3]{\varepsilon}} \quad (9)$$

Згідно з відомою моделлю Максвелла-Ейкена [3], нижні і верхні межі можна отримати так:

$$\lambda_{ex} = \lambda_{er} \frac{2\lambda_{er} + \lambda_{we} - 2(\lambda_{er} - \lambda_{we})(1 - \varepsilon')}{2\lambda_{er} + \lambda_{we} + (\lambda_{er} - \lambda_{we})(1 - \varepsilon')} \quad (10)$$

$$\lambda_{ex} = \lambda_{we} \frac{2\lambda_{we} + \lambda_{er} - 2(\lambda_{we} - \lambda_{er})\varepsilon'}{2\lambda_{we} + \lambda_{er} + (\lambda_{we} - \lambda_{er})\varepsilon'} \quad (11)$$

Еквівалентно ПКТ проріз секції отриманий з використанням площі зваженим методом [10, 15, 16], у формулі (9). Проте, цей метод, описаний в (11) можна розглядати як мідь та ізоляційні матеріали, розташовані послідовно, які існують як паралельний термічний стан.

Застосовуючи це для розрахунку еквівалентної ПКТ [14, 15], формула може бути описана так:

$$\lambda^{eff} = \frac{\varepsilon \frac{\lambda_{eu}}{2\lambda^m + \lambda_{eu}} + (1 - \varepsilon) \frac{\lambda_{ex}}{2\lambda^m + \lambda_{ex}}}{\frac{\tau}{2\lambda^m + \lambda_{eu}} + \frac{1 - \tau}{2\lambda^m + \lambda_{ex}}} \quad (12)$$

Інша еквівалентна ПКТ розраховується аналітичним методом, яка представляє собою класичну оцінку [15, 16].

Ця формула, запропонована Даніелем, який описує класичні оцінки еквівалентної поведінки різнорідних матеріалів, які можуть бути тлумаченням з точки зору проблем включення.

Висновки

Отримані математичні моделі для розрахунку теплопровідності на основі структури пористого металевих матеріалу. За допомогою методу мережевого теплового опору, слота ПКТ та отриманої формули для обчислення можна поліпшити точність розрахунку слота ПКТ.

Розрахунки показали, що цей метод є більш правильним і точним як спосіб отримання теплопровідності слота ПКТ, який є важливим параметром для розрахунку теплового випромінювання в аналізі теплового поля і розрахунку теплового опору нових моделей та параметрів. Цей параметр буде застосований в області дослідження теплових характеристик електричної машини, що є важливим чинником

в розробці і оптимізації електричних машин.

References

1. L. Idoughi, X. Mininger, F. Bouillault, L. Bernard, E. Hoang, Thermal model with winding homogenization and FIT discretization for stator slot, *IEEE Trans. Magn.* 47 (12) (2011) 4822–4826.
2. B. Kou, X. Huang, H. Wu, L. Li, Thrust and thermal characteristics of electromagnetic launcher based on permanent magnet linear synchronous motors, in: 2008 14th Symposium on Electromagnetic Launch Technology, 2008, pp. 1–6.
3. J.K. Carson, S.J. Lovatt, D.J. Tanner, A.C. Cleland, Thermal conductivity bounds for isotropic, porous materials, *Int. J. Heat Mass Transf.* 48 (11) (2005) 2150–2158.
4. Y. Liu, H.F. Chen, H.W. Zhang, Y.X. Li, Heat transfer performance of lotus-type porous copper heat sink with liquid GaInSn coolant, *Int. J. Heat Mass Transf.* 80 (2015) 605–613.
5. H. Nakajima, Fabrication, properties and application of porous metals with directional pores, *Prog. Mater Sci.* 52 (7) (2007) 1091–1173.
6. H. Xuzhen, L. Jiayi, Z. Chengming, L. Liyi, Calculation and experimental study on temperature rise of a high overload tubular permanent magnet linear motor, *IEEE Trans. Plasma Sci.* 41 (5) (2013) 1182–1187.
7. A. Tassarolo, C. Bruzzese, Computationally efficient thermal analysis of a low-speed high-thrust linear electric actuator with a three-dimensional thermal network approach, *IEEE Trans. Ind. Electron.* 62 (3) (2015) 1410–1420.
8. X. Song, N. Mijatovic, S. Zou, B.B. Jensen, J. Holbøll, AC losses and their thermal effect in high-temperature superconducting machines, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 26 (4) (2016) 1–5.
9. K. Zhou, J. Pries, H. Hofmann, Computationally efficient 3-D finite-element-based dynamic thermal models of electric machines, *IEEE Trans. Transp. Electrification* 1 (2) (2015) 138–149.
10. M. Galea, C. Gerada, T. Raminosa, P. Wheeler, A thermal improvement technique for the phase windings of electrical machines, *IEEE Trans. Ind. Appl.* 48 (1) (2012) 79–87.
11. G.J. Li, J. Ojeda, E. Hoang, M. Gabsi, Thermal-electromagnetic analysis of a fault-tolerant dual-star flux-switching permanent magnet motor for critical applications, *IET Electr. Power Appl.* 5 (6) (2011) 503–513.
12. Q. Lu, X. Zhang, Y. Chen, X. Huang, Y. Ye, Z.Q. Zhu, Modeling and investigation of thermal characteristics of a water-cooled permanent-magnet linear motor, *IEEE Trans. Ind. Appl.* 51 (3) (2015) 2086–2096.
13. M. Du, H. Zhang, Y. Li, Y. Liu, X. Chen, Y. He, Synthesis of a bimodal porous Cu with nanopores on the inner surface of Gasar pores: influences of preparation conditions, *Appl. Surf. Sci.* 360 (2016) 148–156.
14. D.C. Hanselman, *Brushless Permanent-Magnet Motor Design*, McGraw-Hill, New York, 1994.
15. L. Daniel, R. Corcolle, A note on the effective magnetic permeability of polycrystals, *IEEE Trans. Magn.* 43 (7) (2007) 3153–3158.
16. L. Li, M. Mingna, Y. Tang, Z. He, Q. Chen, Iron loss and inductance analysis considering magnetic nonlinearity in multi-segmented plate permanent magnet linear motor, *IEEE Trans. Magn.* 48 (11) (2012) 3009–3012.

Рецензія/Peer review : 16.5.2019 р.

Надрукована/Printed : 3.6.2019 р.

Рецензент: д. техн. н., проф. М.Ф. Смирний

КОМПАНІЯ «ЕЛЬВОРТІ» – 145 РОКІВ РОЗВИТКУ

Сьогодні провідний виробник сільгосптехніки в Україні – компанія «Ельворті» – за свій 145-річний шлях розвитку розширює асортимент і освоює нові напрямки поставок техніки на європейські ринки. Нещодавно корпорація повернула собі історичну назву на честь засновників англійців братів Роберта та Томаса Ельворті та відроджує ту культуру інновацій, яку принесли на українську землю засновники заводу. Дана культура інновацій передбачає впровадження новітніх технологій у виробництво, в результаті прості зернові сівалки перетворюються на високотехнологічні агрегати. Водночас оновлюються комплектуючі і матеріали, а також розширюється асортимент шляхом освоєння нових видів машин.

Під час свого існування компанія створює як високотехнологічні машини, так і техніку для невеликих фермерських господарств. Так, розроблено сівалку **Astra 3** звуженої ширини захвату – 3 м. При цьому вона втілює нові конструктивні рішення, що раніше були реалізовані в модельному ряді зернових сівалок Premium, розрахованих на більш високотехнологічні господарства: полімерний висівний апарат з плавним регулюванням норми висіву, дводисковий сошник підвищеної міцності зі зміщенням, система електронного контролю сівби, яка забезпечує інформацією про засіяну площу, норму висіву.

Однією з нових у модельному ряді є зернова сівалка **Alfa 6** (рис. 1), яка придатна для використання в технології «міні-тілл». Останнє стало можливим завдяки тиску сошника на ґрунт у 80–120 кг та посиленій конструкції повідкової групи. Зернова сівалка **Alfa 6** обладнана висівним апаратом, виготовленим з полімерних матеріалів, який дає змогу плавно встановлювати норму висіву на будь-яке значення в діапазоні від 1,5 до 400 кг/га.



Рис. 1. Зернова сівалка Alfa 6



Рис. 2. Просапна сівалка Vesta 8 Profi

«Найсвіжіше» рішення, яке компанія вивела на ринок – просапні сівалки з можливістю внесення рідких добрив. Компанією проведено аналіз місцевостей та проаналізовано дані щодо зростання обсягів застосування рідких добрив під польові культури замість сухих, оскільки велика частка угідь по весні потерпають від браку вологи в ґрунті, який зводить нанівець ефект від внесення гранульованих добрив. Завдяки цьому розроблені 8-рядні пневматичні сівалки Vega 8 Profi і Vesta 8 Profi (рис. 2) з баками для рідких міндобрив. Агрегат Vesta 8 Profi, призначений для роботи по виораному і добре вирівняному полю, має 2 баки місткістю по 350 л, а Vega 8 Profi, придатна для сівби по мінімальному обробітку ґрунту, обладнана баком місткістю 1100 л. Вся система внесення рідких міндобрив (насоси, трубопроводи тощо), яку ми встановлюємо на свої сівалки, закуповується у світових лідерів у цьому сегменті ринку.

Узагальнюючи можна сказати: компанія досягла успіху завдяки якісному контролю деталей на етапі виробництва та складання техніки. Зокрема потрібно відмітити, що для виготовлення деталей використовується високоміцна австрійська сталь, що, в свою чергу, призвело до зменшення ваги та компактності конструкції та надало можливість досягти таких високих робочих експлуатаційних швидкостей.

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 № 11 від 31.05.2019 р.

Підп. до друку 06.06.2019 р. Ум. друк. арк. 37,25 Обл.-вид. арк. 40,39
Формат 30x42/4, папір офсетний. Друк різнографією.
Наклад 100, зам. № _____

Тиражування здійснено з оригінал-макету, виготовленого
редакцією журналу “Вісник Хмельницького національного університету”
редакційно-видавничим центром Хмельницького національного університету
29016, м. Хмельницький, вул. Інститутська, 7/1. тел (0382) 72-83-63