

ISSN 2307-5732

DOI 10.31891/2307-5732

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

2.2019

ВІСНИК

Хмельницького

національного

університету

Технічні науки

Technical sciences

SCIENTIFIC JOURNAL

HERALD OF KHMELNYTSKYI NATIONAL UNIVERSITY

2019, Issue 2, Volume 271

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, № 2 (271)

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=aIUP9OYAAAAAJ
Index Copernicus	http://jml2012.indexcopernicus.com/passport.php?id=4538&id_lang=3
РИНЦ	http://elibrary.ru/title_about.asp?id=37650
Polish Scholarly Bibliography	https://pbn.nauka.gov.pl/journals/46221

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

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

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

**Рекомендовано до друку рішенням вченої ради Хмельницького національного університету,
протокол № 9 від 28.03.2019 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

50 ПЛІДНИХ РОКІВ КАФЕДРИ ГАЛУЗЕВОГО МАШИНОБУДУВАННЯ ТА АГРОІНЖЕНЕРІЇ

КАФЕДРА ГАЛУЗЕВОГО МАШИНОБУДУВАННЯ ТА АГРОІНЖЕНЕРІЇ ЗА 50 РОКІВ РОЗБУДОВИ

В цьому році кафедрі галузевого машинобудування та агроінженерії виповнюється 50 років. На сьогодні кафедра забезпечує викладання не лише таких чисто загальноінженерних дисциплін, як «Теорія механізмів і машин», «Деталі машин», «Деталі машин і основи конструювання», «Підйнятно-транспортні машини», «Прикладна механіка», «Машинознавство», «Історія інженерної діяльності», «Автоматизація розрахунків в машинобудуванні», «Історія науки і техніки», а й цикл дисциплін, пов'язаних зі спеціальностями «Галузеве машинобудування» (спеціалізація «Машини та апарати харчових виробництв») та «Агроінженерія» (АІ), організовує всі види практик (навчальну, виробничу, конструкторсько-технологічну, переддипломну), курсове і дипломне проектування.

Викладання основних дисциплін кафедри «Теорія механізмів і машин» (ТММ) і «Деталі машин», які були закріплені за кафедрою деталей машин базового інституту, розпочате автором на загальнотехнічному факультеті в м. Хмельницький з вересня 1963 р., але вже у вересні 1964 р. на факультеті були організовані самостійні кафедри загальнонаукових і загальноінженерних дисциплін, в склад останньої входили згадані дисципліни. В грудні 1967 р. були створені кафедри «Опору матеріалів і деталей машин» та «Теоретичної механіки і теорії механізмів і машин», які в 1969 р. рішенням Мінвузу УРСР реорганізовані і була створена кафедра «Галузевого машинобудування та агроінженерії» (до 1989 р. вона мала назву «Деталей машин і теорії механізмів і машин», потім до 1998 р. – «Основи конструювання машин», 2017 р. – «Машинознавства»). Першим завідуючим кафедрою було обрано першого ректора інституту к. т. н., доц. Ганжурова С. М. На кафедрі в той час працювало 7 викладачів і 1 лаборант, з них три кандидати технічних наук (доц. Ганжуров С. М., ст. викладачі Іванов С. Г. і Каплун В. Г.), два старших викладачі (Добжанський Ю. Ф., Кіницький Я. Т.) і три асистенти (Костогриз С. Г., Андрійчук А. Ф., Гладкий Я. М.). Кафедра знаходилась у другому навчальному корпусі та займала дві кімнати загальною площею 120 м². В одній із кімнат була розташована лабораторія ТММ і кабінет кафедри, в іншій – кабінет деталей машин, які були частково обладнані ще в 1965-66 рр. ст. викладачами Кіницьким Я. Т. і Журавльовим І. М. У 1970 р. кафедрі були виділені нові приміщення в 3-му навчальному корпусі, площа яких складала 172 м². Зараз кафедра займає приміщення загальною площею 476,3 м², в яких розміщені лабораторія ТММ, кабінет деталей машин, кабінет підйнятно-транспортних машин, центр SolidWorks, лабораторія обладнання переробних і харчових виробництв, лабораторія обладнання громадського харчування, кабінет агроінженерії.

В 2000 р. при кафедрі була відкрита підготовка інженерів-механіків зі спеціальності «Обладнання переробних і харчових виробництв», а в 2017 р. – «Агроінженерія», створена відповідна секція, завідувачем якої призначений д. т. н., проф. Стечишин М. С.

Зараз на кафедрі працює 11 штатних викладачів, із них 5 д. т. н. (Кіницький Я. Т., Костогриз С. Г., Олександренко В. П., Стечишин М. С., Харжевський В. О.), 6 доцентів, к. т. н. (Білик Ю. М., Курської В. С., Лук'янюк М. В., Марченко М. В., Мартинюк А. В., Медвечук Н. К.). Отже, всі викладачі на кафедрі мають наукові ступені, причому 45,5% – доктори наук. Навчально-допоміжний персонал – 3 чол.

Завжди основним принципом формування викладацького складу кафедри були і є високий професіоналізм викладачів, їх науковий потенціал і педагогічна майстерність. Шляхи досягнення цієї мети різні, основні з них наступні:

- а) запрошення викладачів з інших ВУЗів або підприємств (доц. Пастух І. М., доц. Сіліна Л. А., ст. викл. Добжанський Ю. Ф.);
- б) запрошення випускників аспірантури інших ВУЗів (Каплун В. Г., Костогриз С. Г., Береговий І. М., Стечишин М. С., Олександренко В. П.);
- в) направлення своїх викладачів в аспірантуру інших ВУЗів (Кіницький Я. Т., Білецький О. О.);
- г) шляхом співшукання (Семенюк М. Ф., Гладкова В. М.);
- д) навчання в аспірантурі університету (Медвечук Н. К., Лук'янюк М. В., Терещенко В. П., Терлецька О. В., Шалапко Ю. І., Харжевський В. О., Марченко М. В., Мартинюк А. В.,

Білик Ю. М.).

Останнім часом кафедра готує викладачів із числа студентів свого університету. У цьому випадку схема підготовки кандидатів наук наступна: 1) студентська науково-дослідна робота; 2) науково-дослідна робота у НДС; 3) аспірантура. Це дозволяє стабілізувати викладацький склад кафедри, підтримувати традиції кафедри та університету, часто більш просто розв'язуються житлові проблеми. Уже зараз на кафедрі половина штатних викладачів – випускники нашого університету (Білик Ю. М., Лук'янюк М. В., Марченко М. В., Мартинюк А. В., Медвечук Н. К., Харжевський В. О.), двоє навчаються в аспірантурі.

За час існування кафедри її викладачами та лаборантами проведена значна робота зі створення матеріальної бази, удосконалення навчальної, науково-методичної, науково-дослідної та виховної роботи. Під час переходу кафедри в новий навчальний корпус були переобладнані лабораторія ТММ і кабінет деталей машин. Особливо ефективно проводилась ця робота з 1.09.1971 р., коли кафедру очолив доц. Каплун В. Г. При цьому слід відмітити велику роботу з облаштування кафедри викладачів: доцентів Костогриза С. Г., Пастуха І. М., ст. викладачів Добжанського Ю. Ф., Кіницького Я. Т., асист. Нестеровського В. В. Це їм належить багато оригінальних розробок, зокрема їх руками протягом 1973 р. були заново переобладнані лабораторії кафедри і створені оригінальний кабінет деталей машин, що не має аналогів в інших ВУЗах України і СНД, сучасна лабораторія ТММ; в 1974 р. розпочате обладнання кабінету підйомально-транспортних машин, яке закінчене в 1996 р. Це дозволило вже в 1973 р. на базі кафедри провести I семінар-нараду завідувачів кафедрами деталей машин і ведучих викладачів ВНЗ України, а в 2002 р. – міжнародну науково-технічну та методичну конференцію «Механіка машин і механізмів», присвячену 40-річчю університету.

Викладачі кафедри приділяють значну увагу розробці навчально-методичної літератури, ними розроблено навчально-методичні комплекси з технічної механіки та теорії механізмів і машин, уніфіковані алгоритми розрахунку механізмів на ЕОМ, фізичні і комп'ютерні моделі механізмів, дидактичні матеріали (альбоми рисунків) до різних дисциплін кафедри, короткі довідники з теорії механізмів і машин та деталей машин, методика рейтингового оцінювання роботи професорсько-викладацького складу і наукових співробітників університету: 4 підручники, 12 навчальних посібників, 105 інших методичних розробок, призначених для організації самостійної роботи студентів, проведення практичних і лабораторних занять, виробничих практик, курсового та дипломного проектування з дисциплін кафедри, використання технічних засобів навчання. В 1997 р. проф. Кіницьким Я. Т. закінчено розробку, а старшим лаборантом Школярюк Ю. І. виготовлення комплексу кольорових (тіньових) моделей плоских механізмів (110 моделей), який дозволяє значно покращити наочність курсу ТММ. В 2005–2007 рр. аналогічні комп'ютерні моделі механізмів розроблені проф. Семенюком М. Ф. Протягом 1990–97 рр. було опубліковано повний текст лекцій з курсу ТММ (9 частин – 791 с.), який послужив основою відповідного підручника. Викладачі кафедри регулярно розробляють та оновлюють робочі програми дисциплін, методичні вказівки до практичних і лабораторних занять та курсового і дипломного проектування, які зараз відповідають освітнім програмам навчання бакалаврів і магістрів. Ними розроблено сотні навчальних програм для ЕОМ. В 1998 р. створено кабінет автоматизованого проектування, який завдяки старанням доц. Харжевського В. О. в 2011 році було переобладнано в центр SolidWorks.

В 1989 р. група викладачів (Каплун В. Г., Кіницький Я. Т., Пастух І. М.) за велику науково-методичну і виховну роботу нагороджена дипломом і премією Мінвузу України. Викладачі Каплун В. Г. і Кіницький Я. Т. у різні роки були нагороджені нагрудним знаком Мінвузу СРСР "За отличные успехи в работе", а проф. Кіницькому Я. Т., Семенюку М. Ф., Пастуху І. М. і доц. Сілінній Л. А., Білецькому О. О. присуджені звання "Відмінник освіти України". В 1980 р. проф. Костогриз С. Г. нагороджений орденом "Знак Пошани", а в 2000 р. йому присвоєно почесне звання "Заслужений працівник народної освіти України".

Поряд з навчально-методичною роботою колектив кафедри приділяє значну увагу науково-дослідній роботі, яка, в основному, виконуються за такими чотирма науковими напрямками: 1) тертя та зношування в машинах; 2) аналіз та синтез механізмів і машин; 3) міцність, зносостійкість та надійність машин і конструкцій; 4) технологія та обладнання хіміко-термічної обробки деталей та інструмента різними методами.

За останні 30 роки 21 викладачів, які працювали на кафедрі, захистили кандидатські дисертації, а 9 викладачів – докторські (Каплун В. Г., Семенюк М. Ф., Кіницький Я. Т., Костогриз С. Г., Стечишин М. С., Олександренко В. П., Пастух І. М., Шалапко Ю. І., Харжевський В. О.), причому доц. Семенюк М. Ф. захищав докторську дисертацію двічі – в ФРН і СРСР. Крім цього, під керівництвом професорів кафедри захистили кандидатські дисертації 14 викладачів інших

кафедр університету. В 1991 р. МВССО СРСР доц. Кіницькому Я. Т. вперше в університеті було присвоєне вчене звання професора без вченого ступеня доктора технічних наук.

В 1987 р. на базі кафедральної науково-дослідної лабораторії створена спільна АН і Мінвузу України лабораторія прогресивних методів зміцнення (наук. керівник – д. т. н., проф. Каплун В. Г.), яка в 1992 р. перетворена в Подільський науковий фізико-технологічний центр (ПНФТЦ, наук. керівник – д. т. н., проф. Каплун В. Г., директор – д. т. н., проф. Пастух І. М.). Лабораторії центру оснащені сучасним обладнанням, як правило, власного виготовлення за розробками Пастуха І. М., Лук'янюка М. В. та ін., яке необхідне для виконання наукових досліджень з безводневого іонного азотування, електроіскрового легування, комплексного зміцнення поверхонь металів. Потужності лабораторії дозволяють виконувати вказані технологічні процеси для потреб промислових підприємств і населення. Крім цього, в інших лабораторіях працює ряд експериментальних установок та стендів, деякі з них розроблені викладачами (Костогризом С. Г., Каплуном В. Г., Семенюком М. Ф., Стечишиним М. С., Лук'янюком М. В. та ін.). Це обладнання дозволяє вести наукові дослідження з надійності та довговічності деталей машин й інструменту, з теорії тертя і зношування в машинах, у тому числі з фретинг-зношування і корозійно-механічного зношування металів в агресивних середовищах.

Викладачі кафедри беруть активну участь у житті університету: проф. Костогриз С. Г. був деканом механічного факультету, проректором університету з навчальної роботи, першим проректором; проф. Каплун В. Г. довгий час був проректором університету з наукової роботи, зараз директор НДІ трибології та матеріалознавства; проф. Олександренко В. П. – начальник науково-дослідного сектору університету, а зараз декан факультету інженерної механіки; деякий час посаду начальника науково-дослідного сектору університету займав проф. Стечишин М. С.; проф. Семенюк М. Ф. був керівником наукового семінару спеціалізованої вченої ради; проф. Кіницький Я. Т. 8 років очолював профсоюзну організацію професорсько-викладацького складу і співробітників університету, 5 років був заступником голови профкому, 3 роки – вченим секретарем спеціалізованої вченої ради з захисту докторських дисертацій, зараз виконує обов'язки голови рейтингового оцінювання НПП університету; доц. Лук'янюк М. В. – незмінний керівник студентського театру естрадних мініатюр (СТЕМ); доц. Медвечук Н. К. була секретарем ради механічного факультету, зараз заступник декана заочного факультету № 1; доц. Харжевський В. О. – відповідальний за впровадження в університеті системи комп'ютерного моделювання SolidWorks; доц. Мартинюк А. В. – відповідальний секретар приймальної комісії університету. У роботі спеціалізованої вченої ради з захисту докторських дисертацій беруть участь доктори наук кафедри. Колишній викладач кафедри доц., к. т. н. Матішин М. В. довгий час очолював кафедру безпеки життєдіяльності, доц., к. п. н. Гладкова В. М. очолювала кафедру педагогіки та психології, а проф., д. т. н. Гладкий Я. М. був деканом заочного факультету № 1, директором Інституту заочного та дистанційного навчання, проф., д. т. н. Шалапко Ю.І. в 2010 р. обраний завідувачем кафедри основ інженерної механіки.

Значна частина наукових розробок кафедри впроваджена у виробництво. Зокрема, результати досліджень, які виконані під керівництвом проф. Каплуна В. Г. і Пастуха І. М., впроваджені на десятках підприємств України та СНД. Розроблені технологічні процеси та обладнання екологічно чисті й дозволяють підвищити (залежно від умов експлуатації) зносостійкість деталей машин та металорізального інструменту в 1,5...3,5 рази, деревообробного інструменту в 3...5 разів, штампів, прес-форм і форм для литва в 1,8...3 рази, зменшити витрати електроенергії на 30...40% і газів у 8...10 разів у порівнянні з існуючими аналогами.

Розробки проф. Стечишина М. С. та доц. Лук'янюка М. В. впроваджені на Хмельницькому м'ясокомбінаті, Хмельницькій фірмі «АДВІС-Запчастина», ВАТ «Тернопільський комбайновий завод». На першому підприємстві впроваджені іонно-азотовані кутерні ножі для обробки ковбасного фаршу, що дозволило збільшити їх зносостійкість у 4 рази при переробці фаршу для ліверних ковбас і в 8...10 разів – для варених та копчених ковбас. На другому підприємстві в результаті впровадження розроблених технологій зміцнення зносостійкість матриці формування головки пальця після лазерної обробки збільшилась в 1,7 рази, а після комплексної ХТО – в 2,5 рази. При цьому зносостійкість матриць вирубних штампів після іонно-плазмового азотування на 40% вища ніж після хромування і, навпаки, зносостійкість матриць формувальних штампів у 1,5 рази вища після термодифузійного хромування. Впровадження на Тернопільському комбайновому заводі робочих коліс, ущільнюючих кілець і кришок насосів, хромованих розробленим способом (А. с. СРСР №1277633) дозволило збільшити термін їх служби: робочих коліс – до 6, кілець – до 7,5 і кришок – до 15 разів.

Наукові розробки проф. Каплуна В. Г., Кіницького Я. Т., Костогриза С. Г., Пастуха І. М.

впроваджені в навчальний процес. Зокрема, наукові розробки проф. Каплуна В. Г. лягли в основу спецкурсу “Підвищення міцності та зносостійкості деталей машин”, розробки проф. Костогриза С. Г. використовуються в спецкурсі “Теорія коливання та віброзахист”. Методи кінематичного аналізу та синтезу механізмів, розроблені проф. Кіницьким Я. Т., Семенюком М. Ф., Харжевським В. О., використовуються у курсі ТММ.

В сучасних умовах розвитку техніки та технологій майже неможливо собі уявити економічно вигідне виробництво без використання сучасних комп’ютерних технологій. Саме тому наш університет активно впроваджує технології комп’ютерного моделювання для підготовки інженерів-механіків.

На сьогоднішній день у світі існує значна кількість інженерних систем комп’ютерного моделювання, причому однією з найпотужніших є система твердотільного параметричного моделювання SolidWorks, яка широко використовується у світі та зокрема на провідних машинобудівних підприємствах України. Система SolidWorks призначена для проектування виробів будь-якої складності та призначення, при цьому повністю змінюється традиційна концепція проектування, що дозволяє у декілька разів скоротити терміни освоєння нової продукції у виробництві.

Саме тому у 2006 році на факультеті інженерної механіки розроблена програма наскрізної комп’ютерної підготовки інженерів на базі системи SolidWorks, а в 2011 р. на базі кафедри машинознавства (нині – кафедра галузевого машинобудування та агроінженерії) створено центр SolidWorks факультету інженерної механіки, в якому проводиться навчання та сертифікація студентів факультету, наукові семінари та курси підвищення кваліфікації для працівників промислових підприємств щодо сучасних методів комп’ютерного моделювання та інженерного аналізу у машинобудуванні.

Поряд з навчально-методичною роботою колектив кафедри приділяє значну увагу науково-дослідній роботі. За 50 років виконано майже 50 госпдоговірних і 20 дербюджетних НДР. Опубліковано 7 монографій, більше 670 наукових статей, у тому числі 18 в науково-метричній базі Scopus; одержано більше 170 авторських свідоцтв або патентів на винаходи, зроблено біля 630 наукових доповідей на різних науково-технічних конференціях. За ці роки 18 викладачів, які працювали на кафедрі, захистили кандидатські дисертації, а 9 викладачів – докторські. Крім цього, під керівництвом викладачів кафедри підготували та захистили кандидатські дисертації ще 10 викладачів інших кафедр університету. Багато наукових розробок викладачів кафедри впроваджені у виробництво. Кафедра підтримує творчі зв’язки з багатьма вітчизняними та зарубіжними навчальними і науковим закладами. При кафедрі працює аспірантура та докторантура.

В 1987 р. на базі кафедральної науково-дослідної лабораторії створена спільна АН і Мінвузу України лабораторія прогресивних методів зміцнення, яка в 1992 р. перетворена в Подільський науковий фізико-технологічний центр. Лабораторії центру оснащені сучасним обладнанням, як правило, власного виготовлення за розробками викладачів кафедри, яке необхідне для виконання наукових досліджень з безводневого іонного азотування, електроіскрового легування, комплексного зміцнення поверхонь металів, проведення наукових досліджень з надійності та довговічності деталей машин та інструменту, з теорії тертя і зношування в машинах, у тому числі з фретинг-зношування і корозійно-механічного зношування металів в агресивних середовищах. Потужності лабораторії дозволяють виконувати вказані технологічні процеси для потреб промислових підприємств і населення.

Кіницький Я.Т., д.т.н., професор,
завідувач кафедри галузевого
машинобудування та агроінженерії,
відмінник народної освіти України,
член Національного комітету України
з теорії механізмів і машин.

ЗМІСТ

МАШИНОЗНАВСТВО ТА ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ В МАШИНОБУДУВАННІ

М. Є. СКИБА, М. С. СТЕЧИШИН, М. В. ЛУК'ЯНЮК, В. П. ОЛЕКСАНДРЕНКО БЕЗВОДНЕВЕ АЗОТУВАННЯ В ТІЮЧОМУ РОЗРЯДІ З НЕЗАЛЕЖНИМИ ПАРАМЕТРАМИ ПРОЦЕСУ	11
М. С. СТЕЧИШИН, А. В. МАРТИНЮК, Ю. М. БЛИК, В. С. КУРСКОЙ ВПЛИВ СЕРЕДОВИЩ НА ІНТЕНСИВНІСТЬ КАВІТАЦІЙНО-ЕРОЗІЙНОГО ЗНОШУВАННЯ МЕТАЛІВ	17
М. П. МАЗУР, В. О. ХАРЖЕВСЬКИЙ ОСОБЛИВОСТІ 3D КОНСТРУЮВАННЯ ФАСОННИХ РІЗЦІВ У СЕРЕДОВИЩІ SOLIDWORKS	23
В. Г. ЗДОРЕНКО УДОСКОНАЛЕННЯ ПРИВОДА КРУГЛОВ'ЯЗАЛЬНОЇ МАШИНИ ТА ВИБІР ЙОГО ПАРАМЕТРІВ ...	29
О. Ю. ВОЛЯНИК, І. В. ПЕТКО ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОДІЇ ОБИЧАЙКИ ТА ГРЕБЕНІВ БАРАБАНУ З ОБРОБЛЮВАНИМ МАТЕРІАЛОМ ПІД ЧАС ОБЕРТАННЯ БАРАБАНУ З ПІДВИЩЕНОЮ ШВИДКІСТЮ	32
Н. Р. ВЕСЕЛОВСЬКА, О. І. МАЛАКОВ, С. А. БУРЛАКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СИЛОВОГО ВПЛИВУ НА РОБОЧІ ОРГАНИ І ПРИВОДИ ЗЕРНОЗБИРАЛЬНИХ КОМБАЙНІВ	37
Є. М. ЗАВЕРАЧ, О. І. СТРЕМЕЦЬКИЙ ІНГІБІТОРИ КОРОЗІЇ АЛЮМІНІЮ В ЛУЖНОМУ СЕРЕДОВИЩІ	44
А. Л. БАШИНСЬКИЙ, С. А. ОСТАШЕВСЬКИЙ, С. Л. БУКОЄМСЬКИЙ ОЦІНКА СТАНУ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОЇ ПІДТРИМКИ ПАРКУ АВТОБРОНЕТАНКОВОЇ ТЕХНІКИ	49
В. В. ГОРІН, В. В. СЕРЕДА РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛООБМІНУ ПІД ЧАС КОНДЕНСАЦІЇ ХОЛОДОАГЕНТІВ У СЕРЕДИНІ МІНКАНАЛІВ	57
М. В. МАРЧЕНКО, В. О. ХАРЖЕВСЬКИЙ КІНЕМАТИЧНИЙ СИНТЕЗ ВАЖІЛЬНИХ МЕХАНІЗМІВ З ПОДВІЙНОЮ ЗУПИНКОЮ ВИХІДНОЇ ЛАНКИ	61
С. Л. ГОРЯЩЕНКО, К. Л. ГОРЯЩЕНКО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ІМПУЛЬСНОГО РОЗПИЛЕННЯ РІДИНИ КОЛИВАЛЬНИМ СОПЛОМ .	67

ТЕХНОЛОГІЇ ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

Н. В. МИХАЙЛОВА, В. О. ПРИВАЛА ОСОБЛИВОСТІ ОЦІНЮВАННЯ ЗАХИСНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ІЗОЛЮЮЧОГО КОСТЮМА ПРАЦІВНИКІВ ХІМІЧНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ	72
О. В. НАХАЙЧУК, Е. А. ЗАХАРОВА, А. А. МІЗРАХ, О. В. МАРЧУК ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТКАНИН З ВИКОРИСТАННЯМ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ	76
А. В. НІКУЛІНА МЕТОДИ МОДЕЛЮВАННЯ ФОРМИ КОСТЮМА ЗА ПРИНЦИПОМ ХУСТКИ	80
О. П. КИЗИМЧУК, Л. М. МЕЛЬНИК, О. А. БОГУНОВА ДОСЛІДЖЕННЯ ТИСКУ ЕЛАСТИЧНОГО ОСНОВОВ'ЯЗАНОГО ТРИКОТАЖУ	85

К. І. ПЕТКО, А. П. СТРОКАНЬ, Г. І. ХАРИТОНЕНКО УДОСКОНАЛЕННЯ ЛАБОРАТОРНОГО МЕТОДУ ОКИСНЕННЯ БЕНЗИЛОВИХ СПИРТІВ ДО ВІДПОВІДНИХ АЛЬДЕГІДІВ	91
Р. В. ГАРГАУН, О. М. КУНИК, Д. Г. САРІБЕКОВА, З. М. ПОПОВА ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СИЛКОНІВ НА ВЛАСТИВОСТІ КОСМЕТИЧНИХ ЕМУЛЬСІЙ ПРЯМОГО ТИПУ	94
РАДІОТЕХНІКА, ЕЛЕКТРОНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ	
Р. Л. ГАВРИЛЮК, Р. В. КРАВЧУК, В. О. ФЕРЕНС, В. М. ЧЕШУН МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ДІАГНОСТУВАННЯ СХЕМ ОПЕРАТИВНОЇ ПАМ'ЯТІ З ДОВІЛЬНИМ ДОСТУПОМ	99
А. А. МЯСИЦЕВ, В. М. ПОЛОЗОВА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ GPU И CPU ДЛЯ МАТРИЧНОГО УМНОЖЕНИЯ	102
Р. В. ХИНЕВИЧ, О. Л. ЯВОРСЬКИЙ СИСТЕМАТИЗАЦІЯ КОМП'ЮТЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ОБРОБКИ ФОТОЗОБРАЖЕНЬ	111
О. С. САВЕНКО МЕРЕЖНИЙ МЕТОД ВІЯВЛЕННЯ ФАЙЛОВОГО ЗЛОВМИСНОГО ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ В КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМАХ ЛОКАЛЬНИХ МЕРЕЖ	114
В. М. ДЖУЛІЙ, В. І. ЧОРНЕНЬКИЙ, О. О. САВЦЬКА МЕТОД ВІЯВЛЕННЯ ТА ПРОТИДІЇ РОЗПОДІЛЕНИМ АТАКАМ, СПРЯМОВАНИМ НА ВІДМОВУ В ОБСЛУГОВУВАННІ	122
А. А. ТКАЧУК, В. Ю. ЗАБЛОЦЬКИЙ, Й. Р. СЕЛЕПИНА, С. А. МОРОЗ, Т. В. ТЕРЛЕЦЬКИЙ ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ БАЗОВИХ СТАНЦІЙ МЕРЕЖ СТІЛЬНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ	128
Т. М. МАНСУРОВ, Р. А. ГАНИФАЕВ СТАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ВХОДЯЩЕГО ПОТОКА ВЫЗОВОВ В SOFTSWITCH	135
В. Ц. МІХАЛЕВСЬКИЙ, Г. І. МІХАЛЕВСЬКА ДЕЯКІ ОСОБЛИВОСТІ ВІРТУАЛІЗАЦІЇ СУЧАСНОГО ІНФОРМАЦІЙНОГО СУСПІЛЬСТВА	140
А. Ю. ШЛІНГ, П. І. ЖЕЖНИЧ МОДЕЛЬ ПОВЕДІНКИ ЗАКЛАДУ ВИЩОЇ ОСВІТИ У ПРОЦЕСІ ПЛАНУВАННЯ НАДАННЯ ОСВІТНИХ ПОСЛУГ НА ОСНОВІ ЛІНГВІСТИЧНОГО АНАЛІЗУ КОМУНІКАТИВНОЇ АКТИВНОСТІ В ОСВІТНИХ ВЕБ-СПІЛЬНОТАХ	145
І. В. ГУЛА, Л. В. КАРПОВА, В. М. МЕЛЬНИЧУК, О. І. ПОЛІКАРОВСЬКИХ МЕТОД ЗМЕНШЕННЯ ПЕРІОДИЧНОЇ СКЛАДОВОЇ ШУМІВ ЦИФРОВИХ СИНТЕЗАТОРІВ ПРЯМОГО СИНТЕЗУ	150
О. В. ОСАДЧУК, В. С. ОСАДЧУК, Я. О. ОСАДЧУК МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ГАЗОРЕАКТИВНОГО ЕФЕКТУ В НАПІВПРОВІДНИКОВИХ СЕНСОРАХ ГАЗУ	160
М. В. ВАСИЛЬКІВСЬКИЙ, А. Ю. ВОЛОВИК, Р. П. ПАЛАМАРЧУК МЕТОД ОЦІНЮВАННЯ ДЖИТЕРУ В ЦИФРОВИХ РАДІОПРИЙМАЛЬНИХ ПРИБОРАХ	167
В. П. МАРЦЕНЮК, А. С. СВЕРСТЮК, О. А. БАГРІЙ-ЗАЯЦЬ, Н. В. КОЗОДІЙ МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ БІОСЕНСОРІВ ТА ІМУНОСЕНСОРІВ	174
В. Г. ДОЗОРСЬКИЙ, Є. Б. ЯВОРСЬКА, О. Ф. ДОЗОРСЬКА, І. Ю. ДЕДІВ, Л. Є. ДЕДІВ, І. М. ПАНЬКІВ СТРУКТУРА СИСТЕМИ ВІДБОРУ БІОСИГНАЛІВ ДЛЯ ЗАДАЧІ ВІДНОВЛЕННЯ КОМУНІКАТИВНОЇ ФУНКЦІЇ ЛЮДИНИ	183

Д. В. ГАВРІЛОВ, А. Ю. ВОЛОВИК, Н. М. ГАВРІЛОВА, Н. В. КОФАНОВА, Д. В. ЯРОВИЙ УНІВЕРСАЛЬНИЙ РЕГІСТР НА ПЛІС	188
В. А. ДРУЖИНІН, В. О. МІЩЕНКО, Ю. М. БОЙКО, О. М. РУБАН РОЛЬ ТА ЗАДАЧІ УПРАВЛІННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЮ МЕРЕЖЕЮ, ПОБУДОВАНОЮ ЗА ДОПОМОГОЮ БЕЗПРОВОДОВИХ РАДІОТЕХНОЛОГІЙ	192
С. С. ПЕТРОВСЬКИЙ ПОБУДОВА ІНФОРМАЦІЙНОГО СЕРЕДОВИЩА ВНЗ	199
В. ЧИГІНЬ, П. МИХАЙЛИШИН ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ БЕЗПЛОТНИЙ АВІАЦІЙНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ФОТОЗАХОПЛЕННЯ	202
ОБМІН ПРАКТИЧНИМ ДОСВІДОМ, ТЕХНОЛОГІЯМИ ТА ОБГОВОРЕННЯ	
Е. А. ЯРЕМЕНКО, Н. А. ЯРЕМЕНКО РАСЧЕТ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КЕССОННЫХ ПЕРЕКРЫТИЙ	207
С. А. БУРЛАКА, В. В. ЯВДИК, А. П. ЄЛЕНИЧ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА СПОСОБИ ОЦІНКИ ВПЛИВУ ПАЛИВ З ВІДНОВЛЮВАНИХ РЕСУРСІВ НА РОБОТУ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГУНА	212
ELSAYED A. ELNASHAR, ZEINAB E. ELNASHAR EGYPTIAN SCHOOL OF STEM AND THE NEEDS' FOR THE LABOUR MARKET OF TEACHER OF EXCELLENCE THROUGH HIGHER EDUCATION	221
А. А. МЯСИЦЕВ ПРОГРАММИРОВАНИЕ ESC РЕГУЛЯТОРОВ SIMONK-30A И EMAX SIMON-12A ЧЕРЕЗ ARDUINO И ПОЛЕТНЫЙ КОНТРОЛЛЕР	228
Ю. П. ЗАСПА ЯДЕРНИЙ ТА ГІДРОДИНАМІЧНИЙ БАФТИНГ, ФЛАТТЕР ТА КОЛАПС В ГЕТЕРОГЕННИХ СИСТЕМАХ: ПСЕВДООПЕРАТИВНА ВИХОР-ХВИЛЬОВА ДИНАМІКА І ТОПОЛОГІЯ ЧОРНОБИЛЬСЬКОЇ ТА САЯНО-ШУШЕНСЬКОЇ КАТАСТРОФ	238

DOI 10.31891/2307-5732-2019-271-2-11-16

УДК 669.1:537.5

М. Є. СКИБА, М. С. СТЕЧИШИН, М. В. ЛУК'ЯНЮК, В. П. ОЛЕКСАНДРЕНКО

Хмельницький національний університет

БЕЗВОДНЕВЕ АЗОТУВАННЯ В ТЛІЮЧОМУ РОЗРЯДІ З НЕЗАЛЕЖНИМИ ПАРАМЕТРАМИ ПРОЦЕСУ

Приведено аналіз переваг безводневого азотування в тліючому розряді з незалежними параметрами процесу, оцінені результати виконаних в цьому напрямку досліджень, намічено перспективи, що відкривають додаткові можливості в плані оптимізації режимів азотування, для забезпечення результатів модифікації максимальної відповідності вимогам підвищення працездатності об'єктів обробки в заданих умовах експлуатації.

Ключові слова: безводневе азотування в тліючому розряді, нітридна зона, незалежні параметри процесу, густина струму, модифікація.

M. YE. SKYBA, M. S. STECHYSHYN, M. V. LUKIANIUK, V. P. OLEKSANDRENKO

Khmelnyskyi National University

HYDROGEN-FREE NITRIDING IN GLOW DISCHARGE WITH INDEPENDENT PARAMETERS OF THE PROCESS

On the basis of developed energetic theory of hydrogen-free nitriding in glow discharge (HFNGD) with independent modes of saturation of metal surfaces by nitrogen, that was approved by laboratory and industrial tests, the results of metallographic, spectroscopic, X-ray structure and frictional analysis research are obtained. The results of made researches shown that autonomous modes of NFNGD provide influence not only of mode parameters (temperature, composition of gas mixture, it's pressure and time of nitriding), but also energetic parameters of adjustment and control of the process (density of current and voltage in gas-discharge camera). It enables to considerably decrease the energy intensity of the process and to expand the possibilities of NFNGD for the alteration of the physical and chemical properties of the nitrated surfaces. The influence of the mode parameters are analysed in the paper: temperature, composition of gas environment and pressure, on the structure and phase composition of nitrated layers and their properties. The series of research were carried out to study the influence of the current density, voltage and specific power of the electrical discharge in gas-discharge camera on the NFNGD process. It was established that the formation of nitrides occurs at the low levels of energies, and the process of surface dispersion becomes more active at high voltages. For the diffusion of nitrogen to the depth of the metal, sufficiently high levels of current density is necessary. Thus, structure and phase composition of nitrides layers are formed by combination of technological and energetic parameters.

Key words: hydrogen-free nitriding in glow discharge, nitride zone, independent process parameters, current density, modification.

У якості одного з ефективних методів поверхневої модифікації металів традиційно використовується азотування в тліючому розряді з взаємозалежними параметрами [1]. Серед всіх характеристик технології найбільші умови зв'язку на інші показники режиму накладає температура поверхні, оскільки для її підтримання необхідна деяка конкретна комбінація електричних параметрів розряду. Забезпечення певної температури поверхні за рахунок факторів, альтернативних розряду, дозволяє не тільки реально оптимізувати процес, але покращити його керованість в аспекті досягнення запланованих результатів. Таким чином, азотування в тліючому розряді з незалежними параметрами відкриває принципово нові можливості як теоретичного, так і технологічного планів. У першу чергу, це стосується покращення керованості модифікаційним процесом, його оптимізації відповідно до вимог подальшої експлуатації. Не дивлячись на очевидні нові можливості, які відкриває застосування цього процесу, він практично не досліджувався ні в теоретичному, ні в експериментальному планах, що не сприяє використанню всіх його потенційних можливостей. Теоретичні дослідження виконані насамперед на основі розробленої енергетичної моделі процесу, котра у значній мірі більш адекватно пояснює всі субпроцеси, які є складовими загального модифікаційного процесу. Комбінування енергетичних параметрів азотування в тліючому розряді як у часі, так і за співвідношенням відкриває нові можливості керованого формування фазової структури поверхневого модифікованого шару відповідно до вимог експлуатації [2].

Процес абсолютно екологічно чистий і порівняно з іншими варіантами, включаючи традиційне азотування в тліючому розряді з взаємозалежними параметрами, енергетично більш вигідний, оскільки у зв'язку з можливістю оптимізації технології витрати енергії скорочуються, що, в свою чергу, позитивно впливає на економіку виробництва.

Результати НДР впроваджуються у виробництво і можуть використовуватися в усіх галузях, де виникає потреба в підвищенні характеристик міцності, зносостійкості, мало- і багатоциклової витривалості, корозійної стійкості металевих виробів (металообробка, авіабудування, деревообробка, виробництво виробів з пластмас і т. ін.).

Прогнозні припущення щодо розвитку об'єкта досліджень – подальші дослідження теорії і практики процесів азотування в тліючому розряді з незалежними параметрами режимів.

Об'єкт дослідження – теорія і практика процесів модифікації металевих поверхонь в тліючому розряді з незалежними параметрами азотування.

Мета роботи – розробка теоретичних основ процесів керованого формування триботехнічних систем шляхом модифікації металевих поверхонь в тліючому розряді з незалежними параметрами, які б узагальнювали теоретичні положення практичної розробки процесів вакуумно-дифузійної газорозрядної поверхневої обробки металів та їх сплавів, експериментальна перевірка теоретичних положень з напрацюванням рекомендацій щодо практичного впровадження процесів АТР (азотування в тліючому розряді).

Вплив параметрів АТР на властивості модифікованого шару

Можливість регулювання процесу насичення поверхні, що є однією з основних переваг АТР, дозволяє отримати модифікований шар заданої структури та фазового складу: на основі азотистого α -твердого розчину як із зовнішньою нітридною зоною, так і без неї, або ж нітридну зону на основі лише ϵ - або лише γ' -фази. Товщина та фазовий склад модифікованого шару визначають властивості азотованої сталі. Нітридна зона, що містить лише γ' -фазу, характеризується достатньо високою пластичністю, зона ж, що містить ϵ -фазу, має меншу пластичність, але вищу корозійну стійкість. Однофазна нітридна зона покращує механічні властивості азотованої поверхні на відміну від двофазної ($\epsilon + \gamma'$) зони, що характеризується підвищеною крихкістю. Втім, за високої швидкості тертя (вище 3 м/с) зона ($\epsilon + \gamma'$) відіграє позитивну роль, запобігаючи адгезійній взаємодії деталей пари тертя [3]. 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.

Наведені положення свідчать про те, що товщина і фазовий склад модифікованого шару мають регулюватися з урахуванням конкретних умов експлуатації деталі. Так, для деталей, що працюють у корозійному середовищі та в умовах зношування при малих контактних навантаженнях необхідний азотований шар із розвинутою нітридною зоною, що забезпечує високий опір корозії і припрацювання поверхонь тертя.

Азотований шар безнітридної зони рекомендується для деталей, що працюють при високих динамічних навантаженнях в умовах зношування при високому тиску; корозійна стійкість та опір абразивному зношуванню в умовах сухого тертя при цьому будуть знижені [4].

Регулювання процесу модифікації поверхні при АТР здійснюється шляхом варіювання технологічними параметрами азотування, які поділяються на дві групи – режимні (температура поверхні, тиск у розрядній камері, склад газової суміші, тривалість насичення) та енергетичні (густина струму і напруга на електродах розрядної камери). Крім того, на результати азотування впливають міжелектродна відстань, конфігурація деталей, їх розміри та спосіб розташування у садці [3]. Вплив режимних параметрів азотування на товщину, фазовий склад та властивості модифікованого шару проаналізовано у роботах [1, 3–5], а саме:

– **Вплив температури.** Азотування конструкційних сталей у тліючому розряді, як правило, проводять при температурах від 500 °С до 600 °С, що не викликає небажаних фазових перетворень, які призводять до значних деформацій деталей [3].

Сталі, з яких виготовляють деталі, що працюють на зношування при невеликих контактних навантаженнях (сталі 20, 45, 20X, 40X та ін.), азотують при температурах від 520 °С до 570 °С (залежно від способу попередньої термообробки). При цьому значного підвищення твердості не відбувається, але покращуються антифрикційні властивості, опір знакозмінним навантаженням та корозії.

Леговані сталі, що застосовується для виготовлення деталей, експлуатаційна надійність яких визначається поверхневою твердістю (наприклад, сталь 38X2MЮА), зазвичай азотуються при температурах від 500 °С до 520 °С [4]. При температурах насичення вище 550 °С твердість поверхні знижується. Взагалі збільшення вмісту легуючих елементів сприяє підвищенню поверхневої твердості модифікованого шару, але його товщина при цьому зменшується. Товщина азотованого шару конструкційних сталей, причому як нітридної, так і дифузійної зони, з підвищенням температури збільшується, однак при температурах вище 600 °С вона може зменшуватись внаслідок виникнення на катоді явища термоелектронної емісії.

– **Вплив складу газової суміші.** Більшість технологічних операцій АТР за аналогією з пічним азотуванням початково проводилися в атмосфері аміаку, що не тільки призводило до екологічних проблем, але й сприяло насиченню поверхні воднем, викликаючи тим самим окрихчення поверхні металу. Тим не менш аміак і сьогодні знаходить широке застосування у якості робочої суміші під час проведення АТР (насамперед, в установках виробництва Росії та Болгарії). Для сучасних західноєвропейських та американських установок більш характерним є використання газової суміші азоту і водню, до якої за необхідності можуть додаватися аргон, метан чи пропан.

При азотуванні в аміаку утворюється модифікований шар з поверхневою нітридною зоною, що переважно складається з γ' -фази. Отримання дифузійного шару безнітридної зони досягається за рахунок розведення аміачної або азотно-водневої атмосфери аргонном. Введення аргону до газової суміші у кількості менше 40 % не впливає на товщину структурних складових азотованого шару, при подальшому збільшенні його вмісту відбувається зменшення товщини нітридної зони і збільшення зони внутрішнього азотування. При 80 % аргону нітридна зона не утворюється взагалі, подальше розбавлення суміші аргонном призводить до зменшення товщини азотованого шару [4].

У [1] наведені залежності глибини азотованого шару від складу насичуючого середовища при безводневого азотуванні в тліючому розряді (БАТР). Зберігаючи всі основні переваги азотування у

водневомістких середовищах, БАТР підвищує пластичні властивості поверхні за рахунок виключення явища водневого окрихнення, додатково знижує витрату енергії та матеріалів, поліпшує умови праці та є екологічно чистим.

– **Вплив тиску.** Залежність товщини модифікованого шару від тиску в газорозрядній камері має екстремальний характер. Підвищення тиску робочої атмосфери зменшує інтенсивність процесу катодного розпорощення поверхневих шарів металу, що призводить до утворення і росту нітридної зони, яка справляє бар'єрний ефект на дифузійний рух азоту вглибину металу. З іншого боку, значне зниження тиску, інтенсифікуючи процес катодного розпорощення, може призвести до повного припинення процесу дифузійного насичення. Таким чином, для будь-якого процесу АТР існує оптимальний тиск p_{opt} робочого газу, що забезпечує його найбільшу насичуючу здатність, а отже й отримання азотованого шару найбільшої товщини. Цей тиск пов'язаний із міжелектродною відстанню d співвідношенням [3]:

$$P_{opt}/d = \text{const}, \quad (1)$$

що дозволяє розраховувати вказаний тиск під час обробки заданої деталі на будь-якій промисловій установці.

Досліджуючи вплив тиску на глибину модифікованого шару при БАТР, Каплун В.Г. зазначає, що для певних умов азотування існує оптимальне значення тиску, що забезпечує максимальну глибину азотування. Зі зміною температури процесу та складу насичуючого середовища значення оптимальних тисків змінюються [1, 2].

Вплив тривалості процесу. У результаті численних експериментальних досліджень було встановлено, що залежність товщини шару h від тривалості насичення τ підкоряється параболічному закону [3]:

$$h = D\sqrt{\tau}, \quad (2)$$

де D – кінетичний коефіцієнт, який враховує реакцію оброблюваної поверхні на зміну зовнішнього середовища.

Таким чином, з часом швидкість зростання товщини шару зменшується аж до повного припинення.

Вплив енергетичних параметрів. Якщо вплив режимних параметрів на результати АТР досліджувався багатьма вченими, то енергетичні параметри, за поодинокими виключеннями [2, 6, 7], у спеціальній літературі, як вітчизняній [2, 6, 8], так і зарубіжній [10 – 13], взагалі не фігурують. Як це не парадоксально, але питання впливу напруги та густини струму на структуру та фазовий склад азотованого шару, його глибину, товщину нітридної зони, твердість модифікованої поверхні, її трибологічні характеристики залишилося поза увагою дослідників, наслідком чого є той факт, що керованість процесу АТР на сьогодні не виходить за рамки, властиві пічному азотуванню – регулювання будови та властивостей модифікованої поверхні здійснюється виключно за рахунок варіювання режимними параметрами. Ігнорування основних кількісних характеристик тліючого розряду, що виступає у якості інтенсифікатора елементарних підпроцесів, які відповідають за утворення модифікованого шару, по суті означає нехтування специфікою АТР, наслідком чого є втрата тих унікальних можливостей керування процесом модифікації, які становлять чи не основну перевагу цієї технології порівняно з іншими видами азотування.

Такий стан речей є тим більш дивним, що вирішальна роль енергетичних параметрів у процесі АТР ніколи не ставилася під сумнів. Так, у роботі [3] вони названі «найважливішими факторами керування дифузійним насиченням в умовах існування тліючого розряду». Один з авторів вказаної роботи, Б.М. Арзамасов, запропонував розглядати густину енергії плазми (ГЕП) у якості додаткового технологічного фактора керування процесом АТР ще у 1979 р., причому кількісною характеристикою ГЕП було названо питому потужність тліючого розряду, яка оцінюється формулою:

$$w_{yd} = UI/S, \quad (3)$$

де U – напруга, кВ; I – сила струму, А; S – площа поверхні зразка, см².

Наведені у роботі [6] результати досліджень свідчать про існування екстремальної залежності між ГЕП, яка є критерієм насичуючої здатності газового середовища, та його загальним тиском. Автори (Б.М. Арзамасов та Т.А. Панайоті) зазначають, що тиск газового середовища, який відповідає максимальній питомій потужності розряду, забезпечує отримання модифікованого шару найбільшої, в заданих умовах, товщини. Втім, слід зауважити, що наведені висновки базуються на результатах дослідів з азотування мідних трубок довжиною 30 мм внутрішнього діаметра 1,6; 3,6 та 5,7 мм, але специфіка азотування отворів малого діаметра, пов'язана з ефектом полого катоду [9], навряд чи дозволяє поширювати його результати на деталі будь-якої конфігурації. Так, аналізуючи наведені на рис. 1 графіки, можна припустити, що подальше збільшення внутрішнього діаметра азотованого зразка призведе до того, що досліджувана залежність взагалі втратить екстремальний характер, а тому підтвердження наведених авторами [6] висновків (або їх спростування) потребує подальших досліджень.

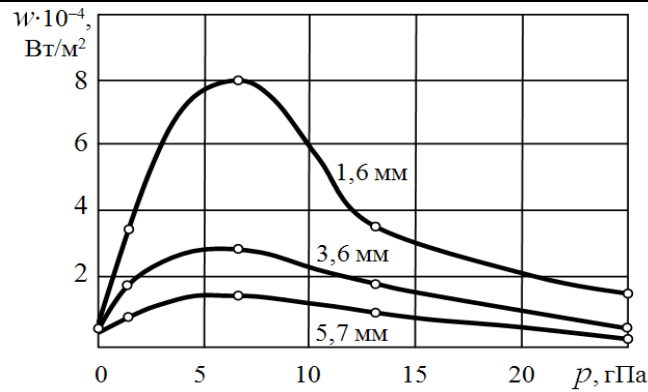
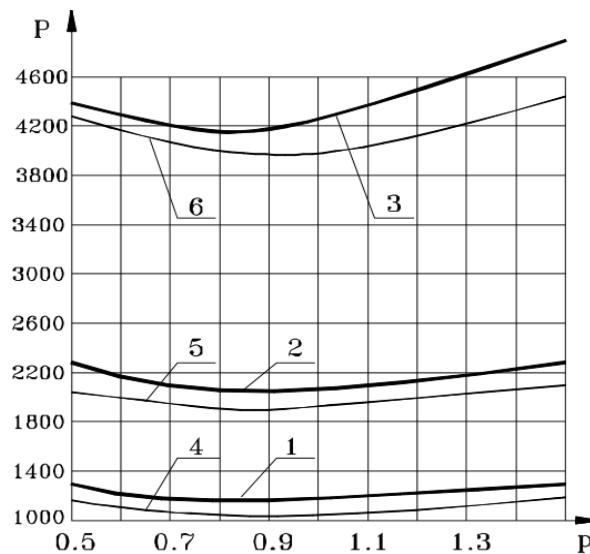


Рис. 1. Залежність питомої потужності розряду від тиску азоту за іонної обробки мідних трубок різного діаметра [6]

На користь останнього говорить і той факт, що описані у [2] експерименти покликані дослідити залежність потужності від тиску, але проведені зі зразками еліпсоїдної форми (що забезпечувало відсутність концентраторів поля) призвели до зовсім інших результатів (рис. 2).

У будь-якому випадку можна констатувати, що питання впливу на характеристики азотованого в тліючому розряді шару енергетичних характеристик – напруги на електродах камери та густини струму – у спеціальній літературі залишається невисвітленим, а тому потребує цілеспрямованих досліджень.



(товсті лінії – N-75%, Ar-25%, тонкі – N-10%, Ar-90%):
 1, 4 – температура 400 °С; 2, 5 – 500 °С; 3, 6 – 600 °С [2]
 Рис. 2. Залежність активної (споживаної) потужності від тиску в режимі термостабілізації

Це підтверджує і той факт, що навіть у тих вкрай нечисленних роботах, де енергетичні параметри згадуються, уся пов'язана з ними інформація зазвичай подається у формі супутніх даних, недостатньо конкретних, аби з них можна було робити однозначні висновки щодо їхнього впливу на характеристики модифікованого шару. Так, викладені у роботі [5] результати дослідження взаємозв'язку середньої енергії іонів з напругою та тиском включають дані щодо залежності товщини нітридної зони від напруги розряду (400 В і 1000 В), але відсутність інформації про склад газової суміші, а також спосіб зміни напруги за умови дотримання постійних значень температури та тиску не дозволяють розглядати їх як основу для встановлення відповідних закономірностей. Те саме можна сказати і про дані, наведені у роботах [7] та [10], в яких досліджувалося питання впливу густини струму на товщину азотованого шару. Отримані авторами результати суперечать один одному – згідно з [10] підвищення густини струму сприяє зростанню товщини модифікованого шару, а згідно з [7] – його зменшенню, а тому з'ясування цього питання потребує проведення подальших досліджень.

Аналізуючи вплив параметрів технологічного режиму процесу АТР на його результати, варто зауважити, що усі вони є взаємозалежними та взаємопов'язаними. Так, склад газової суміші впливає на напругу запалювання тліючого розряду, а зміна напруги і густини струму впливає на температуру процесу насичення [3]. Очевидно, що при забезпеченні незалежності параметрів технології відкриваються широкі додаткові можливості як для інтенсифікації процесу, так і для якісного керування наслідками модифікації. У цьому випадку, наприклад, незалежно від умови підтримання температури можливе пригнічення, або, навпаки, інтенсифікація тих чи інших субпроцесів, а через них – створення різних структур модифікованого

шару [2].

У світовій практиці проблема забезпечення незалежності температури від енергетичних параметрів режиму АТР вирішується введенням джерела підігріву, альтернативного тліючому розряду. Найбільш розповсюдженим варіантом апаратної реалізації цього підходу є використання так званих камер «з гарячими стінками». Найбільш повно їхня будова (рис. 3) і принцип дії описані у [11, 12].

Ключова особливість конструкції цих камер, що відрізняє їх від камер «з холодними стінками», в яких температура садки забезпечується виключно розрядом, відображена вже у самій їхній назві – стінки таких камер підігріваються спеціальними електричними пристроями, що дозволяє реалізувати процес АТР в області більш низьких напруг і таким чином уникнути ризику виникнення дугового розряду, який може пошкодити модифіковану поверхню.

Суттєве спрощення керування процесом є ключовим моментом, на якому зосереджують увагу автори, описуючи переваги вказаного типу обладнання, але при цьому жоден з них не підіймає питання, яким чином зниження енергетичних параметрів позначається на характеристиках модифікованого шару.

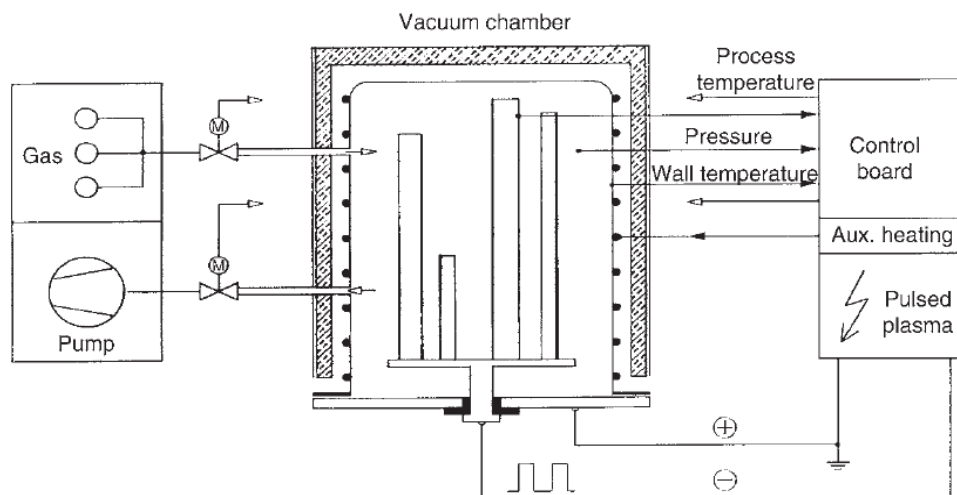


Рис. 3. Будова газорозрядної камери «з гарячими стінками» [11, 12]

Більше того, навіть у випадках, коли проведені експерименти дозволяють дослідити вказані залежності, автори ігнорують таку можливість.

Так, у роботі [13] порівняння властивостей азотованих шарів, отриманих на різних типах обладнання, подається у контексті дослідження впливу на процес АТР методу нагріву оброблюваної деталі – за рахунок розряду і, так званого, змішаного, що передбачає наявність джерела додаткового підігріву. Відмінності у характеристиках модифікованих шарів, отриманих після азотування за аналогічних режимних параметрів, у вказаній роботі пояснюються виключно різницею у конструктивному рішенні технологічного обладнання, хоча очевидно, що обидва досліджувані процеси відбуваються за різних енергетичних параметрів (які автор навіть не вважає за потрібне фіксувати), а тому логічно припустити, що саме вони справляють вирішальний вплив на результати модифікації.

Висновки

Таким чином, дослідження впливу енергетичних параметрів процесу АТР на його результати становить важливу наукову задачу, що відкриває додаткові можливості в плані оптимізації режимів азотування, здатних забезпечити результати модифікації, що найкраще відповідають вимогам підвищення працездатності об'єктів обробки в заданих умовах експлуатації.

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 / И. М. Пастух. – Харьков : ННЦ ХФТИ, 2006. – 364 с.
3. Ионная химико-термическая обработка сплавов / Б. Н. Арзамасов, А. Г. Братухин, Ю. С. Елисеев, Т. А. Панайоти. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1999. – 400 с.
4. Лахтин Ю. М. Структура и прочность азотированных сплавов / Ю. М. Лахтин, Я. Д. Коган. – М. : Металлургия, 1992. – 176 с.
5. Арзамасов Б. Н. Химико-термическая обработка металлов в активизированных газовых средах / Б. Н. Арзамасов. – М. : Машиностроение, 1979. – 224 с.
6. 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.

7. Diaz-Guillen J. C. Effect of nitriding current density on the surface properties and crystallite size of pulsed plasma-nitrided AISI 316L / J. C. Diaz-Guillen, E.E. Granda-Gutierrez, G. Vargas-Gutierrez, M. R. Diaz-Guillen // *Journal of Materials Sciences and Chemical Engineering*. – 2015. – No. 3. – P. 45–51.
8. Stechyshyn M.S. Influence of the Ionic Nitriding of Steels in Glow Discharge on the Structure and Properties of the Coatings / M.S. Stechyshyn, A.V. Martynyuk, Y.M. Bilyk, V.P. Oleksandrenko, N.M. Stechyshyna // *Materials Science*. – 2017. – 53 (3). – P. 343–349.
9. Москалев Б. И. Разряд с полым катодом / Б. И. Москалев. – М. : Энергия, 1969. – 186 с.
10. Spalvins T. Advances and Direction of Ion Nitriding / T. Spalvins // 2nd Ion Nitriding Conference, Ohio, September 18-20. – Ohio, 1989. – P. 3–11.
11. Pye D. Practical Nitriding and Ferritic Nitrocarburizing / D. Pye. – Ohio : ASM International, 2003. – 260 p.
12. Steel Heat Treatment. Metallurgy and Technologies / edited by G. E. Totten. – Portland, Oregon, USA : Taylor & Francis Group, 2006. – 834 p.
13. Ribet F. Influence of the Method of Heating on Ion Nitriding / F. Ribet // *Ion Nitriding : proceedings of an International conference of Ion Nitriding, Cleveland, Ohio, USA, 15–17 September 1986* / edited by T. Spalvins. – Ohio : International, 1987. – P. 83–96.

References

1. Kaplun V. G. Ionnoe azotirovanie v bezvodnorodnyh sredah : monografiya / V. G. Kaplun, P. V. Kaplun. – Hmel'nickij : HNU, 2015. – 315 s.
2. Pastuh I. M. Teorija i praktika bezvodnorodnogo azotirovanija v tlejušhem razrjadě / I. M. Pastuh. – Har'kov : NNC HFTI, 2006. – 364 s.
3. Ionnaja himiko-termičeskaja obrabotka splavov / B. N. Arzamasov, A. G. Bratuhin, Ju. S. Eliseev, T. A. Panajoti. – M. : Izd-vo MGTU im. N. Je. Bauman, 1999. – 400 s.
4. Lahtin Ju. M. Struktura i pročnosť azotirovanih splavov / Ju. M. Lahtin, Ja. D. Kogan. – M. : Metallurgija, 1992. – 176 s.
5. Arzamasov B. N. Himiko-termičeskaja obrabotka metallov v aktivizirovanih gazovyh sredah / B. N. Arzamasov. – M. : Mashinostroenie, 1979. – 224 s.
6. Skyba M. Ie. Doslidžennia protsesiv bezvodnevoho azotuvannia v tliučomu rozriadi / M. Ie. Skyba, M.S. Stechyshyn, V.P. Oleksandrenko, V.S. Kurskoi, A.V. Martyniuk // *Problemy trybolohii. – Khmelnytskyi*, 2018. – № 2. – S. 6–16.
7. Diaz-Guillen J. C. Effect of nitriding current density on the surface properties and crystallite size of pulsed plasma-nitrided AISI 316L / J. C. Diaz-Guillen, E.E. Granda-Gutierrez, G. Vargas-Gutierrez, M. R. Diaz-Guillen // *Journal of Materials Sciences and Chemical Engineering*. – 2015. – No. 3. – P. 45–51.
8. Stechyshyn M.S. Influence of the Ionic Nitriding of Steels in Glow Discharge on the Structure and Properties of the Coatings / M.S. Stechyshyn, A.V. Martynyuk, Y.M. Bilyk, V.P. Oleksandrenko, N.M. Stechyshyna // *Materials Science*. – 2017. – 53 (3). – P. 343–349.
9. Moskalev B. I. Razrjad s polym katodom / B. I. Moskalev. – M. : Jenerģija, 1969. – 186 s.
10. Spalvins T. Advances and Direction of Ion Nitriding / T. Spalvins // 2nd Ion Nitriding Conference, Ohio, September 18-20. – Ohio, 1989. – P. 3–11.
11. Pye D. Practical Nitriding and Ferritic Nitrocarburizing / D. Pye. – Ohio : ASM International, 2003. – 260 p.
12. Steel Heat Treatment. Metallurgy and Technologies / edited by G. E. Totten. – Portland, Oregon, USA : Taylor & Francis Group, 2006. – 834 p.
13. Ribet F. Influence of the Method of Heating on Ion Nitriding / F. Ribet // *Ion Nitriding : proceedings of an International conference of Ion Nitriding, Cleveland, Ohio, USA, 15–17 September 1986* / edited by T. Spalvins. – Ohio : International, 1987. – P. 83–96.

Рецензія/Peer review : 14.1.2019 р.

Надрукована/Printed : 10.4.2019 р.

Стаття прорецензована редакційною колеґією

М. С. СТЕЧИШИН, А. В. МАРТИНЮК, Ю. М. БІЛИК, В. С. КУРСКОЙ
Хмельницький національний університет

ВПЛИВ СЕРЕДОВИЩ НА ІНТЕНСИВНІСТЬ КАВІТАЦІЙНО-ЕРОЗІЙНОГО ЗНОШУВАННЯ МЕТАЛІВ

Встановлено, що інтенсивність кавітаційно-ерозійного зношування металів зумовлена сумісною дією механічних і хімічних факторів, а під час кавітації в корозійно-активних середовищах – електролітах – корозійні процеси проходять за електрохімічним механізмом. При цьому фізичні властивості середовища на інтенсивність руйнування проявляються двома: фізичні властивості середовища (поверхневий натяг, тиск пари, в'язкість, питома густина і т. п.) визначають динамічні характеристики кавітаційних бульбашок і мікроструменів рідини, а хімічні властивості – корозійні процеси при мікроударному навантаженні. Аналіз і узагальнення теоретичних і експериментальних робіт дозволив розробити схему корозійно-механічного зношування (КМЗ) в середовищах-електролітах, в основі якої лежить втомно-електрохімічна природа руйнування металів в системах метал+середовище.

Ключові слова: кавітація, механізми кавітаційного зношування, схема корозійно-механічного зношування, (M1+M2+C); метал-середовище (M+C).

M. S. STECHISHIN, A. V. MARTYNYUK, YU. M. BILYUK, V. S. KURSKOY
Khmelnytskyi National University

ENVIRONMENTAL EFFECTS ON THE INTENSITY OF CALCULATION AND EROSION WOODING METALS

It is established that the intensity of cavitation and erosion wear of metals is determined by the coaction of mechanical and chemical factors, and when cavitation in corrosive environments - electrons, corrosion processes pass through the electro-chemical mechanism. In this case, the physical properties of the environment on the intensity of destruction are manifested in two ways: the physical properties of the medium (surface tension, vapour pressure, viscosity, specific density, etc.) determine the dynamic characteristics of the cavitation bubbles and liquid micro-flows, and the chemical properties are corrosive processes with micro-shock load. The analysis and generalization of theoretical and experimental work allowed to develop a scheme of corrosion-mechanical wear (KMW) in such environments as electrolytes, which is based on the fatigue electrochemical nature of the destruction in systems metal- environments.

Keywords: cavitation, mechanisms of cavitation wear, scheme of corrosion-mechanical wear, (M1 + M2 + E); metal-environment (M + E).

Вступ. Швидкість руйнування поверхонь металів при кавітаційно-ерозійному зношуванні в робочих середовищах, які є здебільшого корозійно-активними до металів, визначається двома факторами: механічним і корозійним. Тому вплив середовищ на швидкість і характер руйнування металевих поверхонь проявляється двома: фізичні властивості середовища визначають динамічні характеристики кавітаційних бульбашок і мікроструменів рідини, а хімічні властивості – корозійні процеси при мікроударному навантаженні [1].

Мета роботи полягає в дослідженні впливу фізико-хімічних властивостей рідких середовищ на інтенсивність кавітаційно-ерозійного зношування металів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомо, що рідини і, зокрема, вода володіють великою руйнуючою силою. Вода здатна проникати в мілкі пори і при ударній дії чинити на тіло розклинюючу дію. На відміну від твердого тіла рідини володіють здатністю руйнувати окремі мікроділянки металу. До переліку важливих показників, які характеризують руйнуючу здатність рідин в умовах мікроударного навантаження, відносяться в'язкість і поверхневий натяг.

При великих швидкостях деформації рідина веде себе як тверде тіло і за відповідних умов проявляє здатність до крихкого руйнування [2, 3]. Здатність рідини до розриву визначається об'ємною міцністю, яка залежить від поверхневого натягу, в'язкості, газонаповнення і т.д.

Підвищення температури рідини сприяє її здатності до розриву і веде до підвищення її кавітаційної здатності. Однак руйнуюча здатність води збільшується лише до температури 44...45 °С, а далі різко зменшується [2, 3].

Із підвищенням коефіцієнта поверхневого натягу рідин інтенсивність кавітаційного руйнування зростає [3]. Згідно з кінетичною теорією чисті рідини витримують дуже високі розтягуючі напруження, а реальні рідини розриваються при тисках близьких до парціального тиску парів рідини. Тому в роботі Лейта [4] для виявлення властивостей рідин на інтенсивність кавітаційного руйнування від температури брали за точку відліку температуру плавлення, а температуру рідини визначали у відсотках від різниці температур точки кипіння і плавлення. При цьому розглядалися такі властивості рідин: тиск пари, в'язкість, поверхневий натяг і питома маса залежно від зазначеної різниці температур для води, бензину і евтектичної суміші Na-K. Шляхом апроксимації експериментальних даних для бензину і води Лейт отримав вираз для величини ерозії в лужних металах через її величину у воді.

Виклад основного матеріалу. Кавітаційна зносостійкість в рідинах, що відрізняються від води, представляє великий практичний інтерес у зв'язку з широким використанням органічних рідин і рідких металів в насосах, турбінах, дизельних двигунах і т.п. Це призвело до широких досліджень кавітаційної і

ерозійної зносостійкості матеріалів у різних рідинах, зокрема в толуолі, етиловому спирті, ацетоні і формальдегіді, бензолі та ефірі, лужних металах. На жаль, у цих дослідженнях не враховано вплив властивостей середовищ на інтенсивність кавітаційного руйнування, за виключенням розглянутої вище роботи [4].

Руйнування металів в корозійних середовищах у більшості випадків гальмується утворенням на їх поверхнях захисних плівок. Кавітація і тертя сприяють руйнуванню та наступному видаленню захисних плівок і росту інтенсивності зношування. Крім того, розчини впливають на механічні властивості металів внаслідок адсорбції поверхнево-активних речовин та ефекту Ребіндера [5, 6].

Особливо поширена думка про електрохімічний характер корозії при кавітації [2, 4], яка протікає з утворенням мікрокомірок, що складаються з анодних і катодних ділянок. Метал втрачається на аноді (1):



Спряженою катодною реакцією є



або



Реакція (2) переважає в кислих розчинах, у яких висока концентрація іонів водню, а реакція (3) – в нейтральних і лужних розчинах. Швидкість корозії визначається величиною струму корозії від сумарної дії мікрогальванопар поверхні.

Коли вперше було відкрито явище кавітації виникла полеміка про те, чи механізм втрат маси є переважно електрохімічним чи повністю механічним. Кренн, Петраччі, Уїлер і Тейлор підкреслюють електрохімічну природу втрат маси металу. Проте теоретичні розрахунки напружень, які створюються одиночною кавітаційною бульбашкою і їх скупченням [7, 8] показали, що їх величина достатня для пластичної деформації в'язкого металу і розтріскування крихкого металу. Більш того, Плессет показав, що матеріали можуть руйнуватися в інертних рідинах.

Сьогодні вже ясно, що кавітаційні пошкодження викликані сумісною дією механічних і хімічних факторів [6]. При кавітації в середовищах-електролітах корозійні процеси проходять за електрохімічним механізмом [3, 4, 7, 9, 10, 11 та ін.].

Переконливим доказом електрохімічної корозії при кавітації є можливість катодного захисту матеріалів в середовищах-електролітах. Застосування катодного захисту для захисту деталей турбін [12], для гвинтів суден [13], робочих коліс насосів в харчовій промисловості [2, 3] дало позитивні результати.

Однак подальші дослідження показали [14], що ефективність катодного захисту залежить від інтенсивності кавітації і з її зростанням різко падає.

Про успішне застосування катодного захисту від кавітації свідчать публікації закордонних авторів [9, 12]. При цьому відмічається, що катодний захист ефективний лише тоді, коли в кавітаційному полі з поверхні металу виділяються бульбашки водню. При низьких катодних потенціалах, коли водень не виділяється, помітного зменшення швидкості руйнування не спостерігається.

Не дивлячись на багаточисельні дослідження, єдиної думки про роль корозійного фактору при КМЗ і кавітації до цього часу немає.

Френкель Я. І. рахує, що при утворенні кавітаційних бульбашок на їх границях появляются іони середовища різних знаків і виникає електричне поле великої напруженості. Такі місцеві електричні поля при їх розряді сприяють іонізації газів і молекул розчинених домішок. Ці новоутворені іони і є можливою причиною виникнення хімічних реакцій між рідким середовищем і металом. Такий підхід поділяють автори багатьох досліджень [9, 15, 16]. Так, наприклад, Б. Вайс [12] рахує, що кавітація викликає зміни хімічної активності середовища, які сприяють електрохімічній корозії.

Багато дослідників [13, 16, 17 та ін.] пов'язують роль корозійного фактора руйнування з наявністю на поверхні металу окисної плівки. При її руйнуванні кавітацією втрати маси збільшуються. При утворенні міцних захисних оксидних плівок, що витримують не руйнуючись мікроударні навантаження (механічні), зносостійкість максимальна.

В.В. Фомін [18] рахує, що вплив корозійного фактору при кавітаційно-ерозійному зношуванні проявляється, головним чином, у зниженні механічної міцності поверхні металу при її контакті з рідиною. Для корозійностійких сталей, на яких утворюються щільні і дуже тонкі оксидні шари на поверхні, міцність їх знижується лише в верхніх шарах, безпосередньо контактуючих з оксидною плівкою. Такої ж думки дотримуються Варінг і Тірувенгадам [13, 19].

М.Г. Тімербулатов вважає [17], що електрохімічні втрати складають лише невелику долю втрат металу і значна частина окислювальних процесів при кавітації протікає шляхом утворення на «ювенільних» поверхнях металів хімічним способом первинних оксидних плівок. Однак за Г.В. Акімовим і Н.Д. Томашовим корозія металів в електролітах проходить переважно за електрохімічним процесом, а тому автор роботи [8] рахує, що корозія металів в системі охолодження дизелів має лише електрохімічну природу.

Уїлер вперше [20, 21] визначив роль корозії при кавітаційно-ерозійному зношуванні як «каталізатора» процесу руйнування поверхонь, яка в даний час є загальноприйнятою для більшості дослідників [3, 4, 7, 22, 23, та ін.]. Однак відсутність єдиної, загальноприйнятої методики визначення корозійних втрат в процесі тертя або кавітації, а також недоліки нині існуючих методик, ускладнюють

розуміння процесів корозійно-механічного зношування та розробку методів прогнозування кавітаційної стійкості металів і сплавів залежно від параметрів зовнішнього навантаження, фізичних і електрохімічних характеристик робочих середовищ тощо.

Дослідження впливу робочих середовищ на КМЗ металів і сплавів проводилося за різними ознаками: 1) галузевий принцип – кавітація в суднобудуванні [6, 15, 16, 25], нафтовій і газовій галузях [8, 9, 22], гідротурбобудуванні і дизелебудуванні [14, 15, 25], в харчовій промисловості [2–4, 7, 24]; 2) за ступенем корозійної агресивності середовища [7, 9, 23]; 3) за складом середовища, вмістом або відсутністю абразивних частинок, газонасиченістю тощо [6, 9, 19].

Більш зручною нам видається класифікація робочих середовищ за типом хімічних реакцій: нейтральні, кислі та лужні середовища. Такий підхід дозволяє об'єднати різні дослідження і систематизувати експериментальні та теоретичні результати.

Найбільша кількість досліджень кавітаційної зносостійкості виконана у звичайній питній (водопровідній) воді. Враховуючи, що питна вода в різних регіонах суттєво відрізняється за своїм хімічним складом, кількістю і видом нерозчинних сполук в електрохімії часто використовують еталонну або жорстку воду ($\text{MgSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$ –0,343 г і $\text{CaCl}_2 \times 6\text{H}_2\text{O}$ –0,61 г на 1 л дистилату). Крім того, воду використовують для порівняння інтенсивності руйнування матеріалів відносно інших рідин і середовищ. Іншим, часто застосовуваним середовищем є 3% водний розчин хлориду натрію, який прийнято за модель морської води.

В роботі [4] основні дослідження кавітаційно-ерозійної зносостійкості вуглецевих конструкційних сталей, нержавіючої сталі, сірого чавуну і групи титанових сплавів з α ; $\alpha + \beta$ і β – структурою проведені в розчинах хлориду натрію. Знайдені співвідношення, які дозволяють за відомими втратами в прісній воді знаходити втрати маси матеріалів в морській воді. Отримані вирази для знаходження швидкості руйнування металів залежно від величини співвідношення корозійного і механічного факторів руйнування, а також розроблені прискорені лабораторні методи оцінки кавітаційної зносостійкості металів в розчинах хлориду натрію, які відповідають показникам зношування в умовах експлуатації обладнання.

Дослідження кавітаційної зносостійкості матеріалів в морській і прісній воді наведені також в роботах [12, 13, 16 та ін.]. Тут, в основному, проведено вибір кавітаційностійких матеріалів, розглядаються розроблені методи прогнозування їх зносостійкості з врахуванням корозійного фактору руйнування поверхонь, вплив термічної, хіміко-термічної та інших способів поверхневого і об'ємного зміцнення металів.

Разом з тим, аналіз цих робіт свідчить про відсутність єдиної методики знаходження корозійного фактору руйнування саме в процесі кавітації, а застосування опосередкованих способів, що базуються на методах екстраполяції приводять до значних похибок [16]. Так само, як і повне ототожнення кінетики зміни потенціалу і мікрореформацій поверхні при кавітації [10].

Роботи, виконані науковою школою під керівництвом професора Прейса Г.О., вигідно відрізняються від інших саме тим, що в них процеси КМЗ і, зокрема, кавітаційно-ерозійного зношування розглядаються комплексно у всіх видах середовищ (нейтральних, кислих і лужних). Крім того, враховуючи

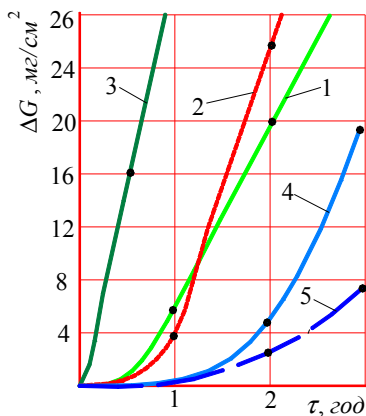


Рис. 1. Кінетика втрат маси сталі 45 при випробуваннях на МСВ: 1 – жорстка вода, 2–3% розчин NaCl; 3 – кисле; 4 – лужне середовище і 5 – сталь 12X 18N10T в 3% розчині NaCl [4, 14]

специфіку робочих середовищ харчових виробництв, за характером і механізмом взаємодії з металами рідкі середовища розділяються також на хімічно і поверхнево-активні [7].

До хімічно-активних середовищ відносяться водні розчини електролітів (кислот, лугів, солей). Молекули речовин розчинених у цих середовищах можуть дисоціювати і тим самим інтенсифікувати електрохімічні процеси. Поверхнево-активні середовища містять речовини з полярними (асиметричними) молекулами, які адсорбуються на поверхнях твердих тіл, утворюють структурні плівки. Можлива як нормальна, так і дотична орієнтація молекул. Нормальна орієнтація характерна для полярних молекул (наприклад, COOH і CH_3 в жирних кислотах). Дотична орієнтація властива молекулам, що мають на кінцях однакові групи атомів (ефіри).

Відповідно до ефекту Ребіндера під дією дотичних і нормальних навантажень адсорбційні шари поверхнево-активних речовин (ПАР) володіють великим опором стиску, але дуже малим опором зсуву. Разом з тим, шари молекул ПАР спричиняють «розклинюючу» дію і відштовхують один від одного поверхні тріщин, а потрапляючи на ділянки з поверхневими дефектами, сприяють відокремленню (диспергуванню) поверхневих шарів металів.

Лабораторні дослідження та результати виробничих випробувань однозначно вказують на тісний зв'язок швидкості руйнування від виду середовища і матеріалу (рис. 1). Ці залежності побудовані за результатами досліджень [4, 7, 11, 24].

Кавітаційно-ерозійне зношування є складним фізико-хіміко-механічним процесом, що виявляється

при мікроударному впливі рідини на поверхню твердого тіла. При цьому, руйнування металів залежить від багатьох чинників: фізико-хімічних властивостей рідини і металу, температури, наявності вібрацій, електрохімічних процесів і т.д.

У зв'язку з винятковою складністю процесу кавітації і пов'язаного з нею кавітаційного руйнування поверхонь в літературі висловлюються різні припущення про можливий механізм кавітаційної ерозії. Цьому сприяла також тенденція пояснення кавітаційного руйнування будь-яким одним фактором. Всі нині висловлені гіпотези можуть бути розділені на чотири групи [3]: засновані на теорії гідромеханічного впливу [13, 23], електрохімічної теорії кавітаційної ерозії [1-4], теорії миттєвих хімічних реакцій [9] і на термодинамічну теорію кавітаційної ерозії [9].

У роботах Г.А. Прейс, Н.А. Сологуба, А.І. Некоза на основі узагальнення великого обсягу фактичного матеріалу більш глибоко і всебічно розглянуті питання КМЗ в електролітах, вивчені його природа і механізми руйнування поверхонь в залежності від умов роботи фрикційного контакту, електрохімічних і фізико-хімічних властивостей середовища.

Так, імпульсний характер тертя зумовлює циклічну зміну напруг в поверхневому шарі деталей, що труться [1]. Дане положення неодноразово підтверджено експериментально [2-4]. Однак тільки в роботах [24, 27] вивчена кінетика інтенсивності зношування металів в процесі тертя і кавітації відповідно до змін дислокаційної структури поверхневих шарів матеріалів.

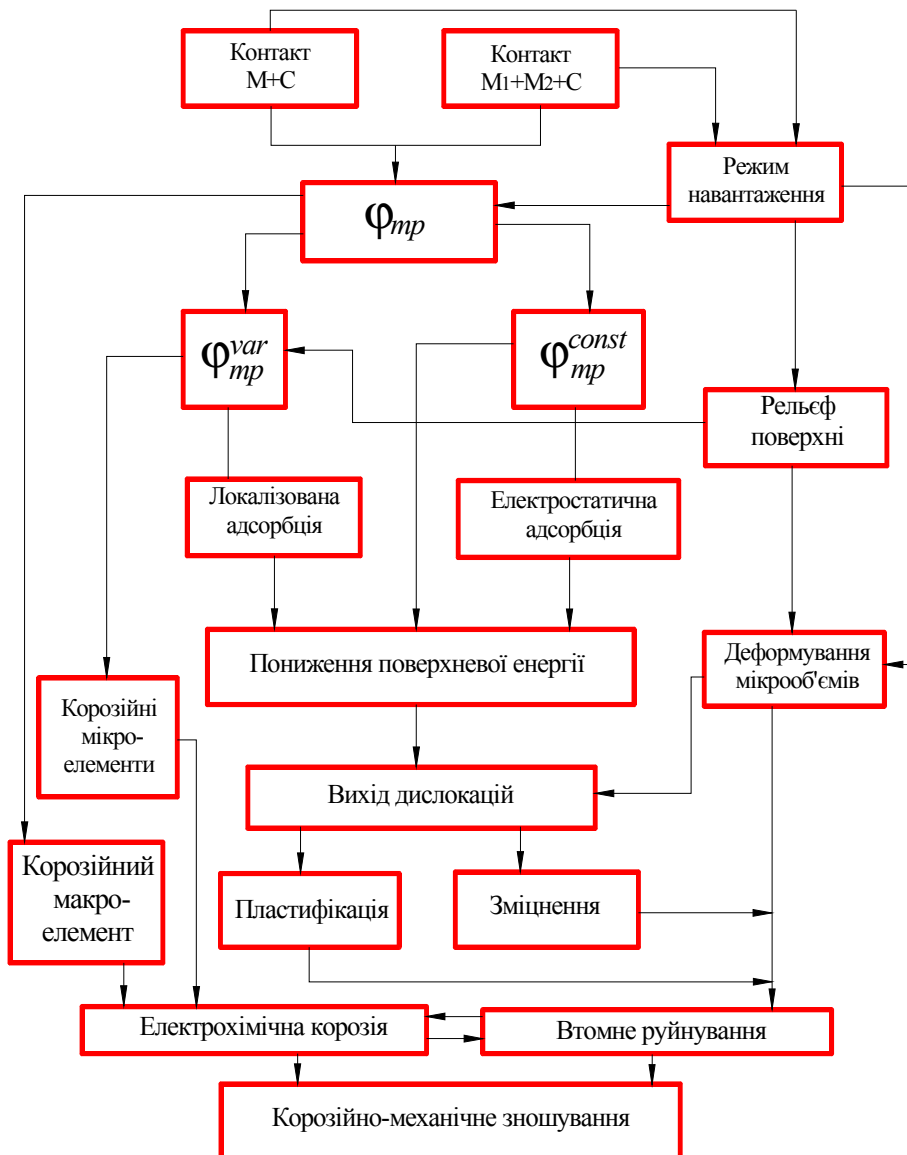


Рис. 2. Схема корозійно-механічного зношування металів у середовищах електролітах [1, 4]

Так, в роботі [27] наведена залежність зміни інтенсивності зношування по масі пари тертя нікель-молібден (Ni-Mo) від часу випробування на тертя. На отриманих кривих в початковий період відзначається різке падіння інтенсивності зношування до деякого мінімального значення, що залежить від величини навантаження, а в подальшому спостерігається ділянка усталеного тертя, на якому ясно виражені циклічно повторювані викиди інтенсивності зношування. Початковий спад інтенсивності зношування в період припрацювання (до першого мінімуму), очевидно, обумовлений згасанням явищ сколу і мікрорізання, які

проявляються в інтрузії і надриву поверхонь матеріалів при терті через локальний характер концентрації напружень в приповерхневих шарах, що сягають межі витривалості. На цій стадії починає формуватися рівноважна шорсткість поверхонь тіл тертя.

Наявність циклічно чергованих викидів інтенсивності зношування свідчить про локалізацію в часі процесу утворення продуктів зносу і, мабуть, про те, що при терті має місце нерівномірний у часі циклічний знос поверхонь тертя, обумовлений специфікою пружно-пластичного деформування приповерхневих шарів тіл. Це прямо або опосередковано підтверджується даними робіт [6, 18, 21]. Крім того, на підставі аналізу зміни структурних і енергетичних характеристик приповерхневих шарів в роботах [6, 9] висловлено припущення про можливість прояву такої залежності. Зіставлення часових залежностей показує, що циклічно повторювані викиди інтенсивності зношування збігаються у часі з ділянками мінімуму щільності дислокацій, отриманих методом феромагнітного резонансу (ФМР) [27]. Тут також видно, що тривалість циклу інтенсивності зношування, як і тривалість циклу зміни міцності тісно пов'язана з умовами навантаження фрикційного контакту. Так збільшення навантаження в два рази призводить до відповідного зменшення тривалості циклів кінетики інтенсивності зношування та структурних змін в приповерхневих шарах з одночасним зростанням величини зносу.

Таким чином, при реалізації умов пружного і пружно-пластичного контакту відповідні взаємопов'язані циклічні зміни напруг і структурні зміни приповерхневого шару визначають втомний характер руйнування металів [27].

У разі реалізації пластичного фрикційного контакту, матеріал руйнується під дією також циклічно змінних напружень, що перевищують межу втоми. При цьому, реалізується малоциклова втома, при якій субмікротріщини утворюються вже при перших циклах навантаження.

Аналіз і узагальнення теоретичних і експериментальних робіт дозволив розробити схему протікання КМЗ в середовищах-електролітах, в основі якої лежить втомно-електрохімічна природа руйнування металів в системах метал1+метал2+середовище (M1+M2+C) і метал-середовище (M+C) [1, 4]. Власне на базі цієї схеми протікання КМЗ і виконані теоретичні і експериментальні дослідження в даній роботі (рис. 2).

Висновки. У роботі розглянуто вплив середовища на інтенсивність корозійно-механічного зношування металів до якого належить і їх кавітаційно-ерозійне зношування. При цьому фізичні властивості середовища (в'язкість, і поверхневий натяг) визначають динамічні характеристики кавітаційних бульбашок і мікроструменів рідини, а хімічні (електрохімічні) – корозійні властивості металів. Виходячи з аналізу літературних джерел та власних досліджень автори обгрунтовують втомно-електрохімічну теорію корозійно-механічного руйнування металів у середовищах-електролітах.

Література

1. Прейс Г.А. О природе коррозийно-механического изнашивания металлов / Г.А. Прейс // Трение и износ. – 1987. – Т. 8. – № 5. – С. 792–797.
2. Сологуб Н.А. Прогнозирование и повышение долговечности деталей технологического оборудования сахарных заводов : дис. ... докт. техн. наук / Н.А. Сологуб. – К., 1993. – 57 с.
3. Некоз А.И. Разработка методов оценки и повышения долговечности деталей оборудования пищевой промышленности, подверженных кавитационно-эрозионному изнашиванию : автореф. на соискание науч. степени дис. докт. техн. наук / А.И. Некоз. – К., 1985. – 43 с.
4. Стечишин М.С. Довговічність деталей обладнання харчової промисловості при корозійно-механічному зношуванні : автореф. на здобуття наук. ступеня дис. докт. техн. наук / М.С. Стечишин. – Хмельницький, 1998. – 32 с.
5. Карпенко Г.В. Влияние среды на прочность и долговечность металлов / Г.В. Карпенко. – К. : Наукова думка, 1976. – 125 с.
6. Погодаев Л.И. Износостойкость материалов и деталей машин при гидроабразивном и кавитационном изнашивании : автореф. на соискание науч. степени дис. докт. техн. наук / Л.И. Погодаев. – М., 1979. – 46 с.
7. Прейс Г.А. Повышение износостойкости оборудования пищевой промышленности / Г.А. Прейс, Н.А. Сологуб, А.И. Некоз. – М. : Машиностроение. 1979. – 208 с.
8. Томашов Н.Ф. Коррозия и коррозионностойкие сплавы / Н.Ф. Томашов, Г.П. Чернова. – М. : металлургия, 1983. – 232 с.
9. Эрозия / под. ред. К. Прис ; пер. с англ. – М. : Мир, 1982. – 464 с.
10. Карасюк Ю.А. О соотношении коррозионного и эрозионного факторов в кавитационном разрушении металлов / Ю.А. Карасюк, В.И. Кочеров, В.В. Бенино и др. // Физ.-хим. механика материалов. – 1976. – № 5. – С. 14–16.
11. Некоз А.И. Анализ соотношения коррозионного и механического факторов при кавитационно-эрозионном изнашивании / А.И. Некоз, Н.А. Сологуб, М.С. Стечишин и др. // Физ.-хим. механика материалов. – 1984. – Т. 20. – № 2. – С. 110–111.
12. Vyas V., Preece C.M. Appl. Phys / V. Vyas, C.M. Preece. – 47, 5133. – 1976. – P. 32–41.
13. Богачев И.Н. Кавитационное разрушение и кавитационно-стойкие сплавы / И.Н. Богачев. – М. : Металлургия, 1972. – 192 с.

14. Козырев С.П. Гидроабразивный износ металлов при кавитации / С.П. Козырев. – М. : Машиностроение, 1971. – 240 с.
15. Трифель М.С. Особенности устройства и контроля катодной защиты гидротурбин от кавитационной эрозии / М.С. Трифель, Е.П. Штерн, Е.Д. Гликштейн // Гидротехническое строительство. – 1979. – № 8. – С. 39–42.
16. Георгиевская Е.К. Кавитационная эрозия гребных винтов и методы борьбы с ней / Е.К. Георгиевская. – Л. : Судостроение, 1978. – 206 с.
17. Тимербулатов М.Г. Влияние коррозии на кавитационную стойкость металлов / М.Г. Тимербулатов // Защита металлов. – 1972. – Т. 8. – № 5. – С. 583–587.
18. Фомин В.В. Гидроэрозия металлов / В.В. Фомин. – М. : Машиностроение, 1977. – 287 с.
19. Кнепп Р. Кавитация / Р. Кнепп, Дж. Дейли, Ф. Хэммит. – М. : Мир, 1974. – 687 с.
20. Waring S. On the role corrosion in cavitation damage / S. Waring, H.S. Preiser, A. Thiruvengadam // J. of ship res. – 1965. – Vol. 9. – P. 200–208.
21. Меттер И. Физическая природа кавитации / И. Меттер // Успехи физических наук. – 1948. – Т. XXXV. – С. 17–21.
22. Коррозия. Справочник / под ред. Л.А. Шрайера. – М. : Metallurgija, 1981. – 632 с.
23. Богачев И.Н. Влияние коррозионных свойств среды на кавитационную стойкость стали / И.Н. Богачев, Ю.Г. Векслер, К.А. Карасюк // Защита металлов. – 1972. – № 3. – Т. 8. – С. 265–269.
24. Стечишин М.С. Кавітаційно-ерозійна зносостійкість деталей обладнання молокозаводів : монографія / М.С. Стечишин, Н.М. Стечишина, А.В. Мартинюк. – Хмельницький : ХНУ, 2018. – 148 с.
25. Thiruvengadem A. Trans / A. Thiruvengadem. – ASME, Ser. D., 85, 1963. – 365 p.
26. Leith W.C. Proc. Am. Soc. Test. Mater / W.C. Leith. – 1985. – 65. – 798 p.
27. Stechishin M.S. Surface layer energy capacity and cavitation resistance of nickel in NaCl solutions / Nekoz A.I., Belyi V.I., Pinchuk V.G., Stechishin M.S. // Soviet Journal of Friction and Wear (English translation of *Trenie i Iznos*) 5(1), p. 131–133.

References

1. Prejs G.A. O prirode korrozionno-mehaničeskogo iznashivaniya metallov / G.A. Prejs // *Trenie i iznos*. – 1987. – Т. 8. – № 5. – С. 792–797.
2. Sologub N.A. Prognozirovanie i povyshenie dolgovechnosti detalej tehnologičeskogo oborudovaniya saharnyh zavodov : dis. ... dokt. tehn. nauk / N.A. Sologub. – K., 1993. – 57 s.
3. Nekoz A.I. Razrabotka metodov ocenki i povysheniya dolgovechnosti detalej oborudovaniya pishhevoj promyshlennosti, podverzhennyh kavitacionno-jerozionnomu iznashivaniyu : avtoref. na soiskanie nauch. stepeni dis. dokt. tehn. nauk / A.I. Nekoz. – K., 1985. – 43 s.
4. Stechyshyn M.S. Dovichnist detalei obladnannia kharchovoi promyslovosti pry koroziiino-mekhanichnomu znoshuvanni : avtoref. na zdobuttia nauk. stupenia dys. dokt. tekhn. nauk / M.S. Stechyshyn. – Khmelnytskyi, 1998. – 32 s.
5. Karpenko G.V. Vlijanie sredy na prochnost' i dolgovechnost' metallov / G.V. Karpenko. – K. : Naukova dumka, 1976. – 125 s.
6. Pogodaev L.I. Iznosostojkost' materialov i detalej mashin pri gidroabrazivnom i kavitacionnom iznashivani : avtoref. na soiskanie nauch. stepeni dis. dokt. tehn. nauk / L.I. Pogodaev. – M., 1979. – 46 s.
7. Prejs G.A. Povyshenie iznosostojkosti oborudovaniya pishhevoj promyshlennosti / G.A. Prejs, N.A. Sologub, A.I. Nekoz. – M. : Mashinostroenie. 1979. – 208 s.
8. Tomashov N.F. Korrozija i korrozionnostojkie splavy / N.F. Tomashov, G.P. Chernova. – M. : metallurgija, 1983. – 232 s.
9. Jerozija / pod red. K. Pris ; per. s angl. – M. : Mir, 1982. – 464 s.
10. Karasjuk Ju.A. O sootnoshenii korrozionnogo i jerozionnogo faktorov v kavitacionnom razrushenii metallov / Ju.A. Karasjuk, V.I. Kocherov, V.V. Benino i dr. // *Fiz.-him. mehanika materialov*. – 1976. – № 5. – S. 14–16.
11. Nekoz A.I. Analiz sootnosheniya korrozionnogo i mehaničeskogo faktorov pri kavitacionno-jerozionnogo iznashivaniya / A.I. Nekoz, N.A. Sologub, M.S. Stechishin i dr. // *Fiz.-him. mehanika materialov*. – 1984. – Т. 20. – № 2. – S. 110–111.
12. Vyas B., Preece C.M. Appl. Phys / B. Vyas, C.M. Preece. – 47, 5133. – 1976. – P. 32–41.
13. Bogachev I.N. Kavitationnoe razrushenie i kavitacionno-stojkie splavy / I.N. Bogachev. – M. : Metallurgija, 1972. – 192 s.
14. Kozyrev S.P. Gidroabrazivnyj iznos metallov pri kavitacii / S.P. Kozyrev. – M. : Mashinostroenie, 1971. – 240 s.
15. Trifel' M.S. Osobennosti ustrojstva i kontrolja katodnoj zashhity gidroturbin ot kavitacionnoj jerozii / M.S. Trifel', E.P. Shtern, E.D. Glikshitejn // *Gidrotehničeskoe stroitel'stvo*. – 1979. – № 8. – S. 39–42.
16. Georgievskaja E.K. Kavitationnaja jerozija grebnyh vintov i metody bor'by s nej / E.K. Georgievskaja. – L. : Sudostroenie, 1978. – 206 s.
17. Timerbulatov M.G. Vlijanie korrozii na kavitacionnuju stojkost' metallov / M.G. Timerbulatov // *Zashhita metallov*. – 1972. – Т. 8. – № 5. – S. 583–587.
18. Fomin V.V. Gidrojerozija metallov / V.V. Fomin. – M. : Mashinostroenie, 1977. – 287 s.
19. Knepp R. Kavitacija / R. Knepp, Dzh. Dejli, F. Hjemmit. – M. : Mir, 1974. – 687 s.
20. Waring S. On the role corrosion in cavitation damage / S. Waring, H.S. Preiser, A. Thiruvengadam // *J. of ship res.* – 1965. – Vol. 9. – P. 200–208.
21. Metter I. Fizicheskaja priroda kavitacii / I. Metter // *Uspehi fizicheskikh nauk*. – 1948. – Т. XXXV. – S. 17–21.
22. Korrozija. Spravochnik / pod red. L.A. Shrajera. – M. : Metallurgija, 1981. – 632 s.
23. Bogachev I.N. Vlijanie korrozionnyh svojstv sredy na kavitacionnuju stojkost' stali / I.N. Bogachev, Ju.G. Veksler, K.A. Karasjuk // *Zashhita metallov*. – 1972. – № 3. – Т. 8. – S. 265–269.
24. Stechyshyn M.S. Kavitatsiino-eroziina znosostoiikist detalei obladnannia molokozavodiv : monohrafiia / M.S. Stechyshyn, N.M. Stechyshyna, A.V. Martyniuk. – Khmelnytskyi : KhNU, 2018. – 148 s.
25. Thiruvengadem A. Trans / A. Thiruvengadem. – ASME, Ser. D., 85, 1963. – 365 p.
26. Leith W.C. Proc. Am. Soc. Test. Mater / W.C. Leith. – 1985. – 65. – 798 p.
27. Stechishin M.S. Surface layer energy capacity and cavitation resistance of nickel in NaCl solutions / Nekoz A.I., Belyi V.I., Pinchuk V.G., Stechishin M.S. // *Soviet Journal of Friction and Wear (English translation of *Trenie i Iznos*)* 5(1), r. 131–133.

Рецензія/Peer review : 11.2.2019 р.

Надрукована/Printed : 10.4.2019 р.

Стаття прорецензована редакційною колегією

ОСОБЛИВОСТІ 3D КОНСТРУЮВАННЯ ФАСОННИХ РІЗЦІВ У СЕРЕДОВИЩІ SOLIDWORKS

В роботі приведений алгоритм графічного 3D профілювання та конструювання різних типів фасонних різців із використанням системи автоматизованого проектування SOLIDWORKS. Реалізація алгоритму дозволяє у автоматичному режимі одержувати 3D-модель та робоче креслення для будь-якого фасонного профілю деталі.

Ключові слова: фасонний різець, профілювання, 3D-модель, фасонна твірна, напрямна поверхня.

MYKOLA P. MAZUR, VIACHESLAV O. KHARZHEVSKYI
Khmelnytskyi National University

THE PECULIARITIES OF 3D DESIGNING OF SHAPED CUTTING TOOLS IN SOLIDWORKS ENVIRONMENT

The paper presents an algorithm for graphical 3D profiling and designing of various types of shaped cutting tools using the computer-aided design system SOLIDWORKS. Shaped cutting tools are used for processing bodies of revolution with various forms of generatrix and are also used mainly in large-scale and mass production. They provide the form identity, the accuracy of the dimensions of details, since these parameters more depend on the accuracy of the tool. The modern method of shaped cutting tools designing is based on obtaining the profile of the back surface along the well-known axial profile of the detail with subsequent constructive refinement depending on the operating conditions and the shape of the connecting surface. In this case, the main task is profiling - determining of the tool's profile in the plane, which is normal to the rear surface. The paper shows the main advantage of graphical profiling, the implementation of which only requires knowledge of the profiling algorithm, but doesn't require calculation formulas specific to each type of the tool and preparing methods of the initial data. The SOLIDWORKS software package allows profiling using the main mathematical principle of surface formation: the movement of the generating line along the guide path. Forming line - the cutting edge of the tool is determined during the treatment process simulation. In this case, it is possible to avoid any profiling errors and obtain the theoretically precise tool profile. In addition, the SOLIDWORKS software package allows memorizing the algorithm used to determine the cutting tool profile for detail of any shape. This will enable the inclusion of such technique into the SOLIDWORKS model design solutions library.

Key words: shaped cutting tool, profiling, 3D-model, shaped forming line, guide path.

Постановка проблеми

Фасонні різці (ФР) використовують для оброблення деталей з різною формою твірної профілю на токарних і токарно-револьверних верстатах, автоматах і напівавтоматах у крупносерійному та масовому виробництві. У порівнянні зі звичайними різцями вони забезпечують ідентичність форми, точність розмірів деталі, яка залежить в основному від точності виготовлення різця, високу продуктивність праці завдяки одночасному обробленню всіх ділянок фасонного профілю деталі і значну економію машинного часу. ФР всіх типів зручні в експлуатації через простоту загострення по плоскій передній поверхні, а також вимагають нижчої кваліфікації обслуговуючого персоналу [1–3]. Такі поверхні і методи їх оброблення не завжди можуть бути реалізовані на сучасних верстатах з ЧПК, а точність до їх виконання часто досить висока.

Основною операцією при конструюванні ФР є профілювання різальної кромки, яке може бути аналітичним і графічним.

Аналітичний метод – достатньо формалізований і полягає у знаходженні відповідності між точкою профілю деталі і точкою профілю інструмента (пряма задача профілювання). Спосіб досить легко програмується, але ці програми є чисто спеціальними і не завжди є «під руками». Аналітичний спосіб часто вимагає значної підготовчої роботи по представленні профілю деталі комбінацією точок із набором необхідних координат.

Графічний метод досить наглядний і вимагає лише знання методики профілювання, яка може бути реалізована для будь-якого профілю. Цей метод є сучасною 2D комп'ютерною реалізацією розроблених раніше ручних методів [1–4], «забутих» через незначну точність. Через деяку трудомісткість графічних побудов профіль деталі задається лише характерними відрізками (прямими, дугами кола і т.п.) із точками початку і кінця. Деколи криволінійні ділянки лінеаризуються. Через такий підхід виникає похибка профілювання, коли криві 2-го порядку на профілі інструмента замінюються прямими або їх комбінацією.

Аналіз останніх джерел

У зв'язку із поширенням на сьогодні методів 3D комп'ютерного моделювання у роботі [5] зроблена одна із перших спроб розв'язувати такі задачі в 3D, коли профіль інструмента одержується в ході імітації оброблення як лінія перетину 3D тіла деталі із передніми і задніми поверхнями тіла інструмента. У такому випадку створюється можливість уникнути будь-яких похибок профілювання і одержувати теоретично точний профіль інструмента. Аналогічно так же могла би вирішуватись і зворотна задача профілювання: за заданою різальною кромкою інструмента визначається форма 3D тіла деталі. Проте специфіка використовуваних програмних пакетів накладає свої особливості на процес профілювання, роблячи його дещо штучним. Для цього пропонується використовувати програмний пакет SOLIDWORKS, який дозволяє реалізувати логічну обумовленість процесу профілювання, а крім того запам'ятовувати використаний

алгоритм для визначення профілю різця для деталі будь-якої форми.





Метою роботи є розроблення методики графічного 3D профілювання і конструювання фасонних різців у середовищі SOLIDWORKS, позбавленої будь-яких похибок профілювання і одержання теоретично точного профілю інструмента.

Виклад основного матеріалу

Задано. Фасонна циліндрична деталь, профіль якої визначається комбінацією відрізків поверхонь і координатами вузлових точок відрізків $x_{di}, r_i, i = 1..n$, де n – кількість точок (рис. 1, а).

Необхідно: спроектувати засобами SOLIDWORKS круглий фасонний різець, який кріпиться на верстаті на оправці за допомогою торцевих штифтів.

Проектування йде у такій послідовності:

1. Будуємо деталь у SOLIDWORKS. Оскільки деталь є тілом обертання, для її створення використаємо команду «Повернута бобьшка / Основание» , викресливши попередньо ескіз осьового профілю деталі, який будемо обертати (рис. 1, б). При простановці розмірів базового ескізу зручно використовувати команду «Ординатный размер»  (горизонтальний  або вертикальний ). Геометрія круглого фасонного різця буде формуватись відповідно до геометрії заданої фасонної деталі.

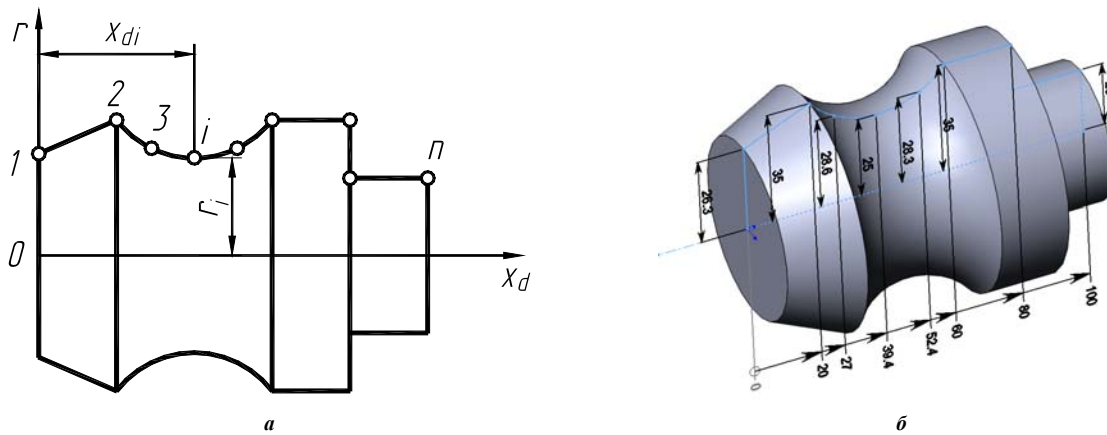




Рис. 1. Приклад фасонної циліндричної деталі

2. Для того, щоб геометрія різця була прив'язана до геометрії фасонної деталі, створимо збірку різець-деталь за принципом «зверху-вниз», відповідно до якого модель різця створимо у контексті збірки. Для цього у моделі фасонної деталі вибираємо команду «Файл – Создать сборку из детали», після чого додаємо попередньо створену деталь у збірку.

3. Будь-яким способом фіксується положення осі обертання фасонного різця у збірці. Як варіант, за допомогою команди «Вставка – Справочная геометрия – Плоскость»  створюємо площину, що розміщена паралельно до площини «Спереди» на визначеній відстані, (рис. 2, а) а також площину, що паралельна площині «Сверху» на визначеній відстані. Для створення осі різця вибираємо команду «Вставка – Справочная геометрия – Ось»  (рис. 2, б) та вибираємо попередньо створені довідкові площини: вісь буде створено як перетин цих площин.

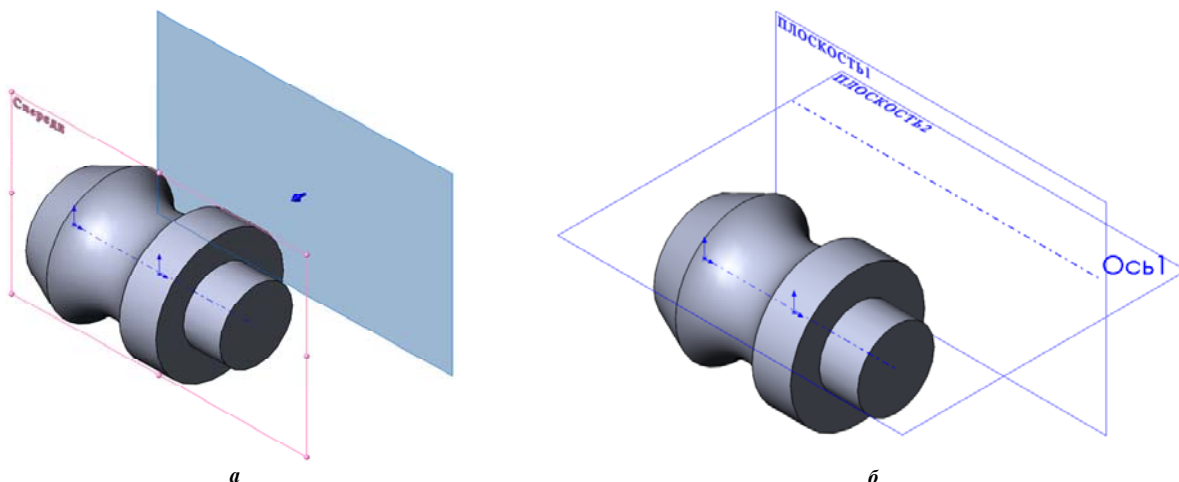



Рис. 2. Створення осі різця у збірці

4. Створюємо модель різця у контексті зборки. На вкладці «Сборка» у меню «Вставити компоненти» вибираємо опцію «Создать». Далі необхідно вказати площину, у якій буде розміщуватись перший ескіз створеної деталі – вибираємо бокову грань фасонної деталі. Через це перевагою методу створення зборки «зверху-вниз» є те, що під час зміни геометрії фасонної деталі геометрія різця буде перебудовуватись відповідним чином.

5. Створення довідкової площини (передньої площини інструмента) у моделі різця під кутом нахилу γ . В ескізі, який був створений у п. 4, викреслюємо лінію від базової точки деталі під кутом γ до горизонталі (як приклад $\gamma = 20^\circ$), що показано на рис. 3,а, після чого виходимо з ескізу та використовуємо цю лінію як довідкову геометрію для створення площини, у якій буде знаходитись передня площина різця («Вставка – Справочная геометрия – Плоскость» ). Інша довідкова геометрія для створення цієї площини (другий параметр) – торцева поверхня деталі (рис. 3, б). Слід відмітити, що у даному випадку передня поверхня проводиться як для різців із $\lambda=0$. Цього буде достатньо, оскільки у будь-якому випадку профіль різальної кромки буде визначений точно. При бажанні, можна побудувати передню поверхню для різців із $\lambda \neq 0$. Довідковою геометрією для створення передньої площини будуть базова лінія [4] та лінія, проведена під кутом γ (див. рис. 3,а).

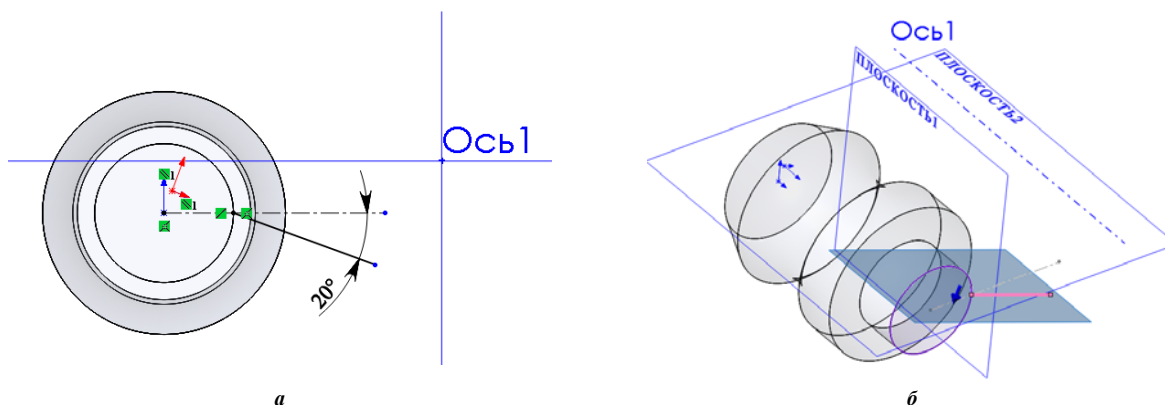



Рис. 3. Створення довідкової площини під кутом γ

6. Створення ескізу профілю різальної кромки різця. У площині, створеній у п. 5, необхідно відкрити ескіз, у якому можна автоматично визначити перетин фасонної деталі та передньої площини різця. Для цього потрібно використати команду «Эскиз – Преобразование объектов – Эскиз вдоль линии пересечения тел» . Результатом роботи цієї команди є створення елементів ескізу (ліній, дуг, сплайнів тощо), які утворюються перетином декількох тіл, або в нашому випадку – тіла деталі та передньої площини. Слід відмітити, що профіль деталі буде перетворений у елементи ескізу з обох боків від осевої лінії, а оскільки для створення профілю різальної кромки різця достатньо профілю лише з одного боку, то зайві елементи потрібно видалити. До одержаного профілю різця потрібно додати дві додаткові (технологічні) ділянки справа та три ділянки зліва [4], відповідні розміри показані на рис. 4.

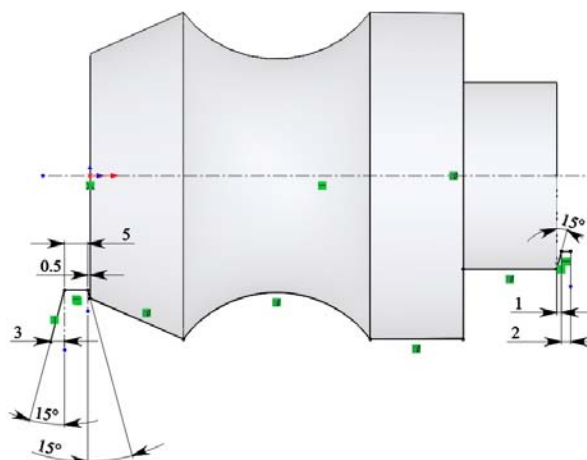





Рис. 4. Приклад створення ескізу профілю різця відповідно до профілю фасонної деталі

7. Виходимо з ескізу профілю різця та повертаємось в тривимірний режим проектування деталі-різця. Наступний крок – створення твердотільної моделі різця за отриманим профілем різальної кромки. Для цього спочатку будемо використовувати команди моделювання поверхнями, що розміщені на відповідній вкладці у

SOLIDWORKS – «Поверхности». По-перше, необхідно обернути отриманий профіль відносно осі різця та отримати відповідну поверхню обертання – за допомогою команди «Поверхність по траєкторії» . При цьому очевидно, що необхідна траєкторія обертання профілю по колу як напрямна лінія (для призматичних фасонних різців такою напрямною буде пряма, нахилена під заднім кутом α до вертикалі). Для створення цього кола спочатку потрібно створити довідкову площину («Вставка – Справочная геометрия – Плоскость» ) , що належить правому торцю різця (на рис. 4 площина зміщена на 3 мм від правого торця деталі за рахунок додаткових ділянок) та викреслити у цій площині коло з центром, що збігається з віссю різця («Ось 1», рис. 3, а, б). Це коло має пройти через відповідну точку профілю різця (рис. 4).

Далі виходимо з режиму креслення ескізу кола, переходимо у вкладку «Поверхности» та вибираємо команду «Поверхність по траєкторії» , в параметрах якої вказуємо профіль (вибираємо створений ескіз різальної кромки відповідно до рис. 4) і маршрут – щойно створене коло як напрямну. Результат роботи команди показаний на рис. 5, а.

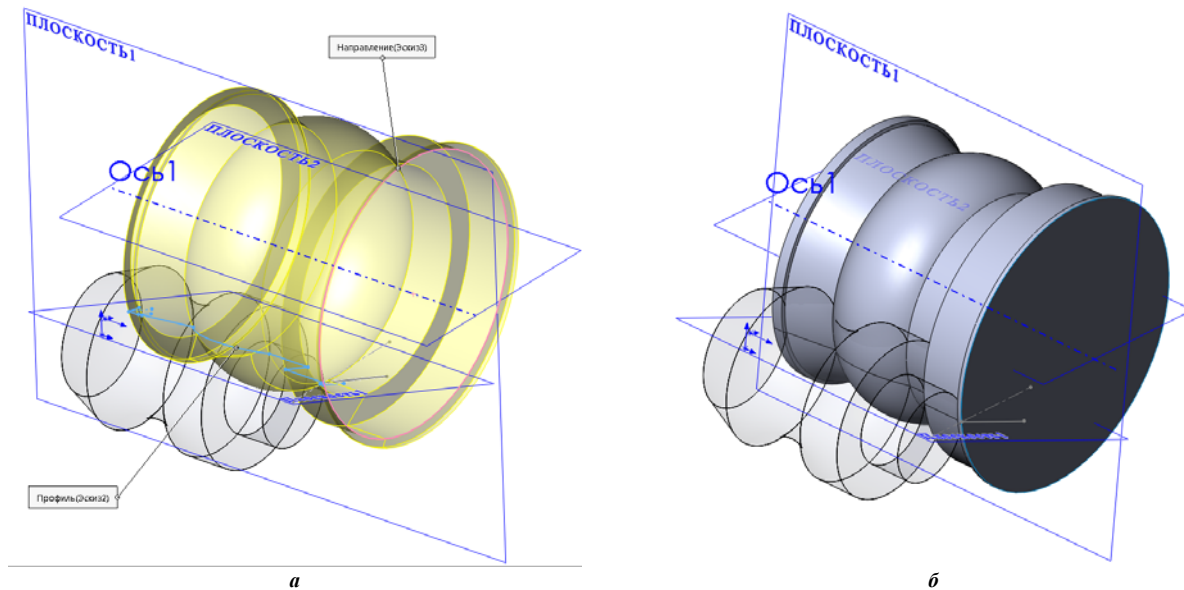


Рис. 5. Створення поверхонь різця
а) формування поверхні обертання; б) формування торцевих поверхонь

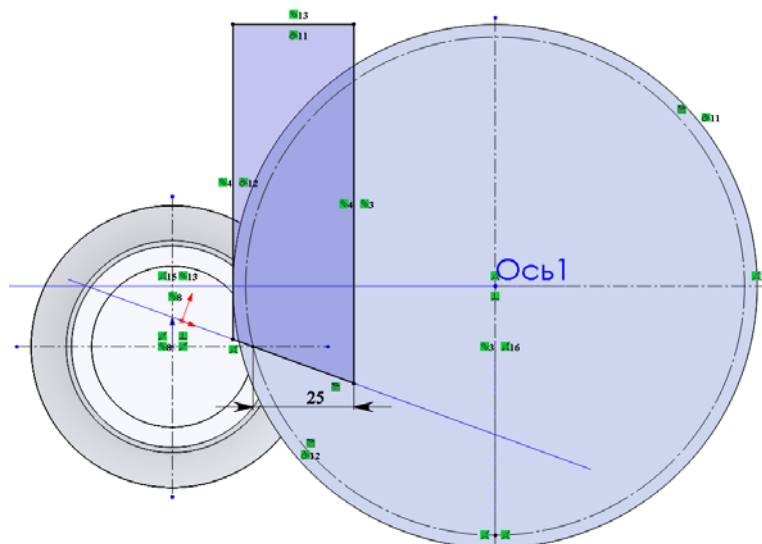




Рис. 6. Завершення побудови моделі різця

8. Формуємо торцеві поверхні різця. Для цього вибираємо команду «Плоская поверхность»  на вкладці «Поверхности», у параметрах якої вказуємо обидва колові краї створеної поверхні обертання, яка показана на рис. 5, а. Результат роботи команди – створення двох плоских поверхонь – торцевих граней різця (рис. 5, б).

9. Отримані поверхні необхідно зшити в одну та сформувати один твердотільний елемент на її основі – модель різця. Для цього вибираємо команду «Сшить поверхность»  на вкладці «Поверхности», в опціях якої необхідно вказати наступне: 1) вибрати три поверхні – поверхню обертання та дві плоскі торцеві поверхні; 2) вибрати опції «Создать твердотельный элемент» та «Объединить элементы».

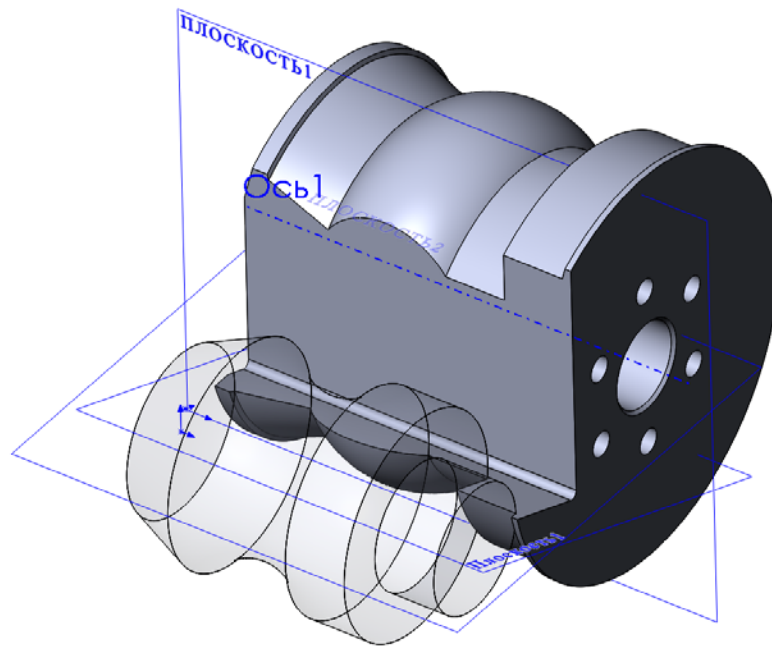



Рис. 7. Приклад побудованої моделі круглого фасонного різця

10. Використовуючи лінію ескізу різальної кромки, створену у п. 5 (накреслена під кутом $\gamma = 20^\circ$), формуємо замкнутий контур з відповідними прив'язками геометрії (рис. 6). За допомогою операції «Витягнутий виріз» , завершуємо побудову різальної частини різця. Подальше створення отворів, фасок, закруглення, а також посадочного отвору з відповідними виточками не представляє жодних ускладнень. Остаточна модель різця (у зборці з фасонною деталлю) показано на рис. 7.

Варто зазначити, що у запропонованому методі зміна розмірів фасонної деталі (рис. 1, б) призводить до автоматичної перебудови профілю круглого фасонного різця (рис. 4), його твердотільної моделі, а також відповідних креслень, які були створені на основі розробленої моделі. Приклад проведеної параметричної перебудови наведено на рис. 8. Це дозволить включити методика таких побудов у бібліотеку типових конструкторських рішень SOLIDWORKS.

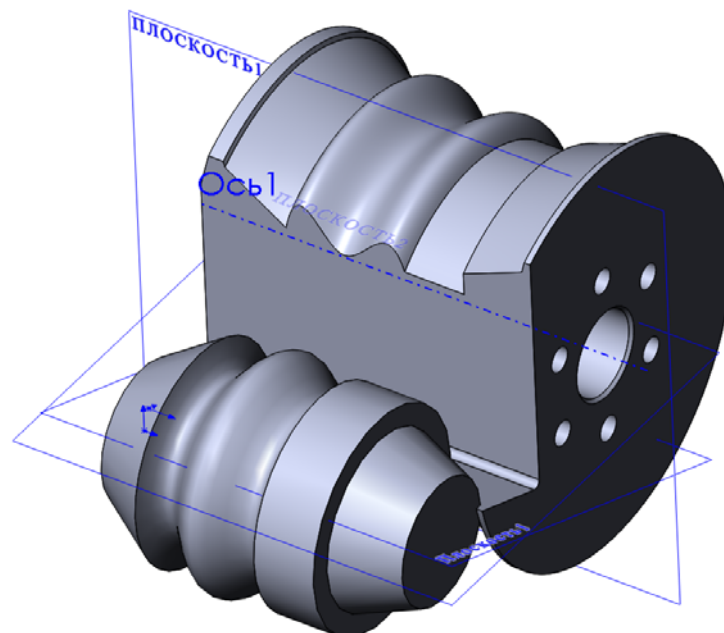


Рис. 8. Модель круглого фасонного різця зі зміненими параметрами профілю деталі

Висновки

Використання програмного пакету для 3D проектування фасонних різців дозволяє уникнути геометричних похибок у профілюванні та одержати параметричний алгоритм конструювання фасонного інструмента для будь-якої форми оброблюваної деталі.

Література

1. Семенченко И. И. Проектирование металлорежущих инструментов / И. И. Семенченко, В. М. Матюшин, Г. Н. Сахаров ; под ред. И. И. Семенченко – М. : Машгиз, 1963. – 952 с.
2. Металлорежущие инструменты : учебник для вузов по специальностям «Технология машиностроения», «Металлорежущие станки и инструменты» / Г.Н. Сахаров, О.Б. Арбузов, Ю.Л. Боровой и др. – М. : Машиностроение, 1989. – 328 с.
3. Грановский Г.И. Фасонные резцы / Г.И. Грановский, К.П. Панченко. – М. : Машиностроение, 1975. – 304 с.
4. Фасонні різці : методичні вказівки для курсового і дипломного проектування студентів напрямку базової вищої освіти «Інженерна механіка» / М.П. Мазур, Л.М. Кузьма. – Видання 2-е виправлене. – Хмельницький : ТУП, 2002. – 41 с.
5. Швець С.В. Новий підхід у профілюванні фасонних різців / С.В. Швець // Журнал Інженерних наук. – Суми : СумГУ, 2016. – Т. 3. —№ 1. – С. 15–19.

References

1. Semenchenko I. I. Proektirovanie metallovezhushhih instrumentov / I. I. Semenchenko, V. M. Matjushin, G. N. Saharov ; pod red. I. I. Semenchenko – M. : Mashgiz, 1963. – 952 s.
2. Metallovezhushhie instrumenty : uchebnik dlja vuzov po special'nostjam «Tehnologija mashinostroenija», «Metallovezhushhie stanki i instrumenty» / G.N. Saharov, O.B. Arbuzov, Ju.L. Borovoj i dr. – M. : Mashinostroenie, 1989. – 328 s.
3. Granovskij G.I. Fasonnye rezcy / G.I. Granovskij, K.P. Panchenko. – M. : Mashinostroenie, 1975. – 304 s.
4. Fasonni riztsi : metodychni vkazivky dlja kursovoho i dyplomnoho proektuvannia studentiv napriamku bazovoi vyshchoi osvity «Inzhenerna mekhanika» / M.P. Mazur, L.M. Kuzma. – Vydannia 2-e vypravlene. – Khmelnytskyi : TUP, 2002. – 41 s.
5. Shvets S.V. Novyi pidkhid u profilivanni fasonnykh riztsiv / S.V. Shvets // Zhurnal Inzhenerykh nauk. – Sumy : SumHU, 2016. – T. 3. —№ 1. – S. 15–19.

Рецензія/Peer review : 11.3.2019 р.

Надрукована/Printed :10.4.2019 р.

Стаття прорецензована редакційною колегією

УДОСКОНАЛЕННЯ ПРИВОДА КРУГЛОВ'ЯЗАЛЬНОЇ МАШИНИ ТА ВИБІР ЙОГО ПАРАМЕТРІВ

Перспективним напрямком підвищення ефективності роботи круглов'язальних машин є удосконалення їх механізмів, зокрема привода. Представлено результати досліджень з удосконалення привода круглов'язальних машин та вибору їх параметрів. Аналіз відомих конструкцій приводів круглов'язальних машин показує, що в основному всі вони виконані такими, що обертальний рух механізмів в'язання та товароприйому передається одним потоком за допомогою циліндричних прямозубих передач. Таке конструктивне виконання привода призводить до появи значних радіальних та осьових навантажень на механізми та їх опори [1], що негативно впливає на якість трикотажного полотна. Відомі конструкції приводів круглов'язальних машин [2] не здатні усунути вказані вище недоліки, оскільки передача потужності, як і раніше, тут здійснюється одним потоком. Тому і надалі в легкому машинобудуванні залишається актуальним питання подальшого удосконалення приводів круглов'язальних машин та метода вибору їх раціональних параметрів.

Ключові слова: круглов'язальна машина, привод круглов'язальної машини, метод вибору параметрів привода.

V. G. ZDORENKO

Kyiv National University of Technology and Design

IMPROVING THE DRIVE OF A CIRCULAR KNITTING MACHINE AND CHOOSING ITS PARAMETERS

A promising direction for improving the efficiency of circular knitting machines is the improvement of their mechanisms, in particular the drive. The results of studies on improving the drive circular knitting machines and the choice of their parameters are presented. Analysis of the known designs of circular knitting machine drives shows that basically all of them are made so that the rotational movement of the knitting mechanisms and the stockpile is transmitted in one stream using cylindrical spur gears. Such constructive execution of the drive leads to the appearance of significant radial and axial loads on the mechanisms and their support [1], which negatively affects the quality of knitted fabric. Known designs of circular knitting machines [2] are not able to eliminate the above disadvantages, since the power transmission, as before, is carried out here in one stream. Therefore, in the future in light engineering, the question of further improving the drives of circular knitting machines and the method of selecting their rational parameters remains relevant.

Key words: circular knitting machine, circular knitting machine drive, method of selecting drive parameters.

Особливістю круглов'язальних машин є значні навантаження, що діють на його механізми, зокрема на голковий циліндр механізму в'язання [1–4] (для круглов'язальних машин типу КО радіальні навантаження на опори голкового циліндра сягають 1704,5 Н, осьові – 1000 Н).

Відомий привод круглов'язальної машини [2], де замість циліндричних прямозубих передач в приводі механізму в'язання використано черв'ячну передачу, не здатен усунути вказаних вище недоліків, оскільки передача потужності тут здійснюється одним потоком.

Для вирішення проблеми зниження та усунення навантажень на механізм в'язання автор пропонує розробку привода круглов'язальної машини з двопоточною передачею потужності механізмам в'язання та товароприйому.

Об'єктом досліджень обрано привод круглов'язальної машини та метод вибору його параметрів, здатні знизити навантаження на механізм в'язання. Під час проведення досліджень та вирішення завдань, поставлених у даній роботі, були використані сучасні методи теоретичних досліджень, що базуються на теорії проектування в'язальних машин та механізмів в'язання круглов'язальних машин.

Постановка завдання. Завданням досліджень стало удосконалення конструкції привода круглов'язальної машини типу КО та розробка метода вибору його раціональних параметрів з метою підвищення ефективності роботи шляхом усунення навантажень, що діють на голковий циліндр та його опори.

Результати та їх обговорення. Відомі конструкції приводів круглов'язальних машин [2–4] мають спільний недолік – значні навантаження механізму в'язання, що негативно впливає на ефективність роботи круглов'язальної машини.

Для усунення зазначеного недоліку пропонується принципово нова конструкція привода круглов'язальних машин (рис. 1).

Привод круглов'язальної машини містить електродвигун 1, за допомогою муфти 2 з'єднаний з черв'яком 3, другим електродвигун 4, за допомогою муфти 5 з'єднаний з другим черв'яком 6, причому черв'як 3 та другий черв'як 6 встановлені діаметрально протилежно один одному та кінематично зв'язані з черв'ячним колесом 7, яке за допомогою обгінної муфти 8 з'єднане з механізмом товароприйому 9, та два водила 10, 11, які з'єднують механізм товароприйому 9 з голковим циліндром 12 механізму в'язання. Крім цього привод оснащено засобом розриву з'єднання черв'ячного колеса 7 з механізмом товароприйому 9 – обгінною муфтою 8, що містить дві обойми – внутрішню 13, жорстко з'єднану з механізмом товароприйому 9, і зовнішню 14, жорстко з'єднану з черв'ячним колесом 7, та ролики 15, розташовані між внутрішньою 13 та зовнішньою 14 обоймами. Обгінна муфта дозволяє розірвати зв'язок черв'ячного колеса 7 з механізмом товароприйому 9 під час використання ручного привода (на рис. 1 не показаний) під час наладки та заправки машини.

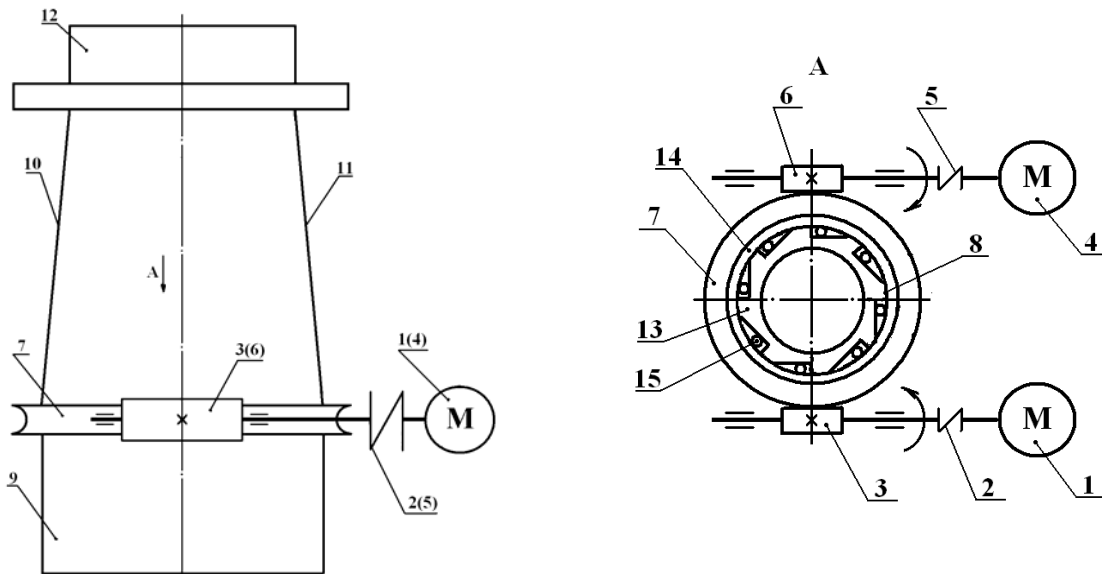


Рис. 1. Кінематична схема привода круглов'язальної машини з двопоточною черв'ячною передачею

Принцип роботи привода такий. При одночасному вмиканні електродвигунів 1, 4 (електродвигуни для забезпечення працездатності привода повинні обертатися в різні боки) обертальний рух їх валів за допомогою муфт 2, 5 передається черв'якам 3, 6 відповідно. Обертальний рух черв'яків приводить в обертання черв'ячне колесо 9, жорстко з'єднане з зовнішньою обоймою 14 обгінної муфти 8. Поворот зовнішньої обойми 14 призводить до заклинювання роликів 15 між зовнішньою 14 та внутрішньою 13 обоймами, що забезпечує зв'язок черв'ячного колеса 7 з механізмом товароприйому 9 та його обертання. Оскільки механізм товароприйому 9 за допомогою водил 10, 11 зв'язаний з голковим циліндром 12 механізму в'язання, останній також починає, синхронно з механізмом товароприйому 9, обертатися, що необхідно для роботи круглов'язальної машини. Сили, що виникають в зачепленнях черв'яків з черв'ячним колесом 7, взаємно урівноважуються і, таким чином, не викликають додаткових навантажень на механізми круглов'язальної машини.

При обертанні машини за допомогою ручного привода обертальний рух голкового циліндра 12 механізму в'язання за допомогою водил 10, 11 передається жорстко з'єднаній з ними внутрішній обоймі 13 та механізму товароприйому 9, жорстко з'єднаному з нею. Поворот внутрішньої обойми 13 призводить до розклинювання роликів 15 і, таким чином, до розриву з'єднання механізму товароприйому 9 з черв'ячним колесом 7. Черв'яки 3, 6, муфти 2, 5 та електродвигуни 1, 4 автоматично відключаються від механізмів в'язання та товароприйому, що призводить до зниження непродуктивних затрат потужності та підвищення довговічності роботи привода.

Вибір параметрів, окрім черв'ячних передач та обгінної муфти, здійснюється по відомим методикам [2, 5]. Особливості вибору параметрів черв'ячних передач і обгінної муфти та перевірки їх працездатності розглянемо нижче.

При виборі розмірів черв'ячного колеса слід виходити з умови:

$$d_2 = mZ_2 \geq d, \tag{1}$$

де d_2, d – ділильний діаметр відповідно черв'ячного колеса та зовнішній діаметр механізму товароприйому;

m – модуль черв'ячного зачеплення;

Z_2 – число зубів черв'ячного колеса.

При виборі розмірів черв'яка доцільно виходити із умови (розвантаження опор механізмів від осьових навантажень):

$$2F_{a2} = 2F_{t1} \leq Q - F, \tag{2}$$

де 2 – коефіцієнт, що враховує наявність двох черв'ячних передач в приводі;

F_{a2} – осьова сила черв'ячного колеса;

F_{t1} – колова сила черв'яка,

$$F_{t1} = \frac{2T_1}{d_1}; \tag{3}$$

T_1 – крутний момент на валу черв'яка;

d_1 – ділильний діаметр черв'яка;

Q – вага механізму товароприйому з урахуванням ваги голкового циліндру механізму в'язання;

F – сила натягу полотна в зоні накатування його в рулон.

Підставивши (3) в умову (2) знаходимо:

$$d_1 \geq \frac{4T_1}{Q-F} = \frac{2P}{(Q-F)\omega}, \quad (4)$$

де P – загальна потужність приводу;

ω – колова швидкість голкового циліндра механізму в'язання.

Перевірку працездатності черв'ячної передачі (зацеплення одного черв'яка з черв'ячним колесом) доцільно здійснювати з використанням умови:

$$T_{max} \geq T_2, \quad (5)$$

де T_{max} – максимально можливий крутний момент черв'ячної передачі;

T_2 – крутний момент на валу черв'ячного колеса, зумовлений взаємодією з одним черв'яком,

$$T_2 = T_1 u \eta, \quad (6)$$

u – передаточне число черв'ячної передачі;

η – коефіцієнт корисної дії черв'ячної передачі.

Згідно з [5]:

$$T_{max} = \left(\frac{a}{61}\right)^3 [\sigma_H]^2, \quad (7)$$

де a – міжосьова відстань черв'ячної передачі, $a = 0,5(d_1 + d_2)$;

$[\sigma_H]$ – допустиме контактне напруження в парі черв'як – черв'ячне колесо.

Працездатність обгінної муфти забезпечується виконанням умови [6]:

$$p_{max} \leq [p], \quad (8)$$

де p_{max} , $[p]$ – відповідно максимальний діючий та допустимий тиск в зоні взаємодії роликів обгінної муфти з обоймами.

Згідно з [7]:

$$p_{max} = 0,418 \sqrt{\frac{T_2 E \operatorname{ctg} 0,5\alpha}{K R l d_p}}, \quad (9)$$

де E – модуль пружності матеріалу обойм муфти;

α – кут заклинювання роликів;

K – кількість роликів;

R – радіус робочої поверхні зовнішньої обойми;

l , d_p – відповідно довжина та діаметр ролика.

Висновки. Аналіз виконаних досліджень дозволяє зробити наступні висновки:

- запропонований привід круглов'язальної машини з двопоточною черв'ячною передачею потужності механізмів товароприйому та в'язання працездатний та надійний в роботі;
- конструкція привода дозволяє повністю компенсувати як радіальні, так і осьові навантаження механізмів круглов'язальної машини і тим самим підвищити надійність та довговічність її роботи;
- запропонована конструкція двопоточної черв'ячної передачі потужності механізмів та методика оцінки її працездатності і ефективності можуть бути використані і для інших типів в'язальних машин та автоматів.

Література

1. Хомяк О. Н. Повышение эффективности работы вязальных машин / О. Н. Хомяк, Б. Ф. Пипа. – М. : Легпромбытиздат, 1990. – 208 с.
2. Пипа Б. Ф. Приводи круглов'язальних машин / Б. Ф. Пипа, О. М. Хомяк, А. І. Марченко. – К. : КНУТД, 2007. – 400 с.
3. Пипа Б. Ф. Приводи в'язальних машин і автоматів з пристроями зниження динамічних навантажень / Б. Ф. Пипа, О. В. Чабан, С. В. Музичшин. – К. : КНУТД, 2015. – 280 с.
4. Чабан В. В. Приводи в'язальних машин / В. В. Чабан, Б. Ф. Пипа, О. В. Чабан. – К. : КНУТД, 2016. – 452 с.
5. Пипа Б. Ф. Деталі машин / Б. Ф. Пипа, О. М. Хомяк, А. І. Марченко. – К. : КНУТД, 2010. – 358 с.

References

1. Homjak O. N. Povyshenie jeffektivnosti raboty vjazal'nyh mashin / O. N. Homjak, B. F. Pipa. – M. : Legprombytizdat, 1990. – 208 s..
2. Pipa B. F. Pryvody kruhloviazalnykh mashyn / B. F. Pipa, O. M. Khomiak, A. I. Marchenko. – K. : KNUTD, 2007. – 400 s.
3. Pipa B. F. Pryvody viazalnykh mashyn i avtomativ z prystroiamy znyzhennia dynamichnykh navantazhen / B. F. Pipa, O. V. Chaban, S. V. Muzychyshyn. – K. : KNUTD, 2015. – 280 s.
4. Chaban V. V. Pryvody viazalnykh mashyn / V. V. Chaban, B. F. Pipa, O. V. Chaban. – K. : KNUTD, 2016. – 452 s.
5. Pipa B. F. Detali mashyn / B. F. Pipa, O. M. Khomiak, A. I. Marchenko. – K. : KNUTD, 2010. – 358 s.

Рецензія/Peer review : 2.2.2019 р. Надрукована/Printed : 10.4.2019 р.

Рецензент: д. т. н., проф. Місяць В. П.

О. Ю. ВОЛЯНИК, І. В. ПЕТКО

Київський національний університет технологій та дизайну

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОДІЇ ОБИЧАЙКИ ТА ГРЕБЕНІВ БАРАБАНУ З ОБРОБЛЮВАНИМ МАТЕРІАЛОМ ПІД ЧАС ОБЕРТАННЯ БАРАБАНУ З ПІДВИЩЕНОЮ ШВИДКІСТЮ

Стаття присвячена дослідженню взаємодії обичайки та гребенів барабану з оброблюваним матеріалом у автоматичній пральній машині в ході виконання операції віджимання з підвищеною швидкістю обертання барабану. Показано сили, що виникають внаслідок такої взаємодії та проаналізовано геометричні параметри гребенів барабану пральної машини.

Ключові слова: пральна машина, барабан, гребінь, обичайка, віджимання.

O. VOLIANYK, I. PETKO

Kyiv National University of Technologies and Design

STUDY OF THE INTERPLAY OF TUB AND DRUM PADDLES WITH MATERIAL DURING ROTATION OF THE DRUM AT HIGH SPEED

The article deals with the processes and forces that arise during the interaction of the material with the components of the drum of the washing machine at a high speed of rotation that occurs during the spin operation. In consumer services in drum washing machines during rotating drum washing mode is performed mechanical effect on the treated material and its mixing, which also provides hydrodynamic activation of the washing solution. It was analysed that the emergence of a drum imbalance as a result of uneven distribution of the processed material substantially limits the possibility of further spinning at an increased frequency of rotation. The regularities of the material distribution on the surface of the shell are investigated. Shown the change of the forces which are acting on the accelerated rotation of the drum as a result of the interaction of surfaces of the lateral faces of the paddles and the treated material, with the change in the side faces of the angle of inclination. The forces that arise at the point of contact of the material and the paddles of the drum of the washing machine are considered. It was investigated that at accelerated rotation of the drum, the material always interacts only with the same surface of the paddle. Considered the conditions that must be ensured for moving the processed element of the material along the surface of the lateral face of the drum paddle. The variants of interaction of material with paddles of various forms are analyzed. Described that at high angles of side edges, without reducing the height of the ridges decreases useful internal volume of the drum due to increased volume, dealing with these ridges. The interconnection of the parameters of the geometric shape of the paddles of the tub and the mode of its rotation is obtained, which allows to find a rational relationship between them and, thus, to increase the efficiency of the spin cycle.

Keywords: washing machine, drum, paddle, tub, spinning.

Вступ

Різні за формою і конструктивним виконанням барабани широко використовуються в техніці для здійснення перемішування матеріалів в різних галузях промисловості. У побутовому обслуговуванні в барабаних пральних машинах під час обертання барабана в режимі прання здійснюється механічний вплив на оброблюваний матеріал і його об'ємне перемішування. Воно необхідне для перенесення відокремлених від волокон забруднень в миючий розчин, який насичений поверхнево активними речовинами (ПАР). Для підвищення ефективності процесу прання барабани забезпечені гребенями, розміщеними на внутрішній поверхні їх обичайки. При цьому забезпечується також і гідродинамічна активація миючого розчину.

Постановка проблеми

Підвищення ефективності відцентрового віджимання оброблюваного матеріалу забезпечується, як правило, збільшенням частоти обертання барабану [1]. Але виникнення дисбалансу барабану в результаті нерівномірного розподілу матеріалу, що віджимається, істотно обмежує можливість подальшого віджимання при збільшеній частоті обертання [2].

Аналіз останніх джерел

Для забезпечення рівномірності розподілу матеріалу, що віджимається в [3, 4], запропоновано кілька конструкцій барабанів. В загальному випадку, рівномірний розподіл матеріалу по поверхні обичайки на глибину барабану буде забезпечувати тільки перенесення його центру мас на вісь обертання барабану, тобто статичне врівноважування [5]. У сукупності зі зміною виконання геометричної форми обичайки, пропонуваною в [6], буде забезпечуватися розподіл оброблюваного матеріалу, що відповідатиме динамічній врівноваженості обертового барабану, при якій вісь обертання буде однією з головних центральних осей інерції барабану з матеріалом [7]. На рис. 1 показана схема однієї із таких конструкцій [8].

Метою роботи є дослідження процесів, що виникають внаслідок взаємодії конструктивних елементів барабану пральної машини з оброблюваним матеріалом.

Виклад основного матеріалу

Розподіл матеріалу, що віджимається, по поверхні обичайки барабану відбувається в початковому періоді відцентрового віджимання, то при збільшенні частоти обертання барабану, при цьому відбувається зміна сил інерції. При переході від операції прання до віджимання найбільш віддалені від осі обертання шари матеріалу, що безпосередньо взаємодіють з поверхнею обичайки, починають утримуватися на ній протягом повного оберту барабану. В той самий час шари, що ближче розташовані до осі обертання ще відриваються від поверхні і падають з початковою швидкістю. В результаті прискореного обертання

барабану, на шари матеріалу, що утримуються на його обичайці, діє складова сили інерції \overline{F}_e^i (рис. 1), яка спрямована по нормалі до траєкторії руху центру мас матеріалу, та складова \overline{F}_τ^i , яка спрямована по дотичній до траєкторії руху. Під дією складової \overline{F}_τ^i матеріал переміщується вздовж обичайки. Такому переміщенню матеріалу перешкоджають нерівності внутрішньої поверхні обичайки.

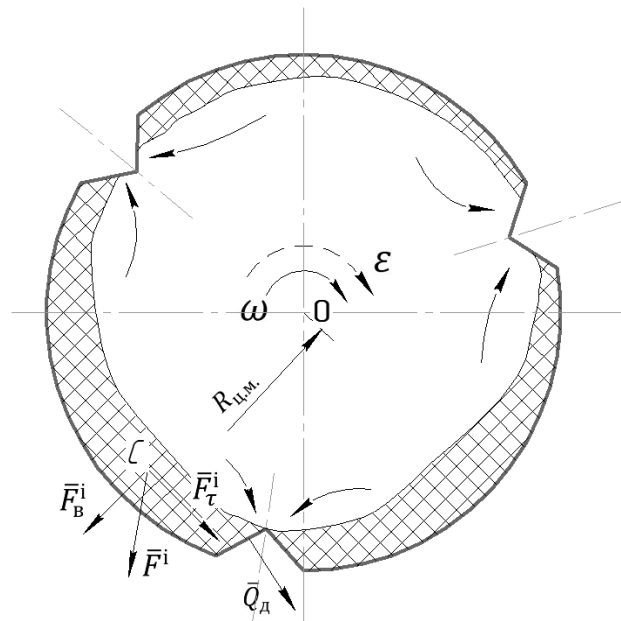


Рис. 1. Схема розподілу матеріалу в барабані

Відомо [9], що від нахилу поверхонь бічних граней гребенів залежать величини кутів відривання і, отже, ефективність механічного впливу на опрацьований матеріал при обертанні барабану в режимі прання. У той же час взаємодія поверхонь бічних граней гребенів з матеріалом відбувається при прискореному обертанні барабану в початковому періоді відцентрового віджимання, що дозволяє знайти залежність величини кута α_1 (рис. 2) від режиму обертання барабану в розглянутий період і конструктивного виконання його обичайки та гребенів і, таким чином, визначати для даних умов величину кута α_1 , яка є раціональною з точки зору забезпечення переміщення матеріалу, який віджимається через гребені і його розподілення на глибину барабану по обичайці. Для оптимізації геометричної форми у гребенів барабану прально-віджимних машин, та нахилу поверхонь бічних граней необхідно враховувати обидва зазначених фактори. Тому що в барабанних прально-віджимних машин відцентрове віджимання проводиться кожного разу в одному і тому ж напрямі обертання барабану, то, при його прискореному обертанні, з матеріалом взаємодіють завжди тільки одні й ті ж поверхні гребенів. Для поліпшення рівномірності розподілення матеріалу при здійсненні операції віджимання у гребенів барабану доцільно оптимізувати нахил поверхонь тільки цих бічних граней виходячи з умови забезпечення переміщення матеріалу, що віджимається, а нахил протилежних граней гребенів виконувати, виходячи з умов їх взаємодії з оброблюваним матеріалом тільки в режимі прання [9]. На рис. 2 показана зміна сил, що діють при прискореному обертанні барабану в результаті взаємодії поверхонь бічних граней гребенів і оброблюваного матеріалу, при зміні у бічних граней величини кута нахилу α_1 .

Прийнято наступні позначення:

O – вісь обертання барабану;

$R_{\text{ц.м.}}$ – радіус внутрішньої поверхні обичайки барабану;

ω, ε – для розглянутого моменту обертання барабану, відповідно, кутова швидкість і кутове прискорення;

ц.м. – центр мас умовно виділеного елемента оброблюваного матеріалу, що взаємодіє з поверхнею бічної грані гребеня, яка набігає на матеріал;

m – маса даного елемента оброблюваного матеріалу;

$R_{\text{ц.м.}}$ – відстань центра ваги розглянутого елемента оброблюваного матеріалу до осі обертання барабану;

α_1 – кут нахилу поверхні бічної грані гребеня, що набігає на матеріал, відносно радіальної площини, яка проведена через вершину гребеня;

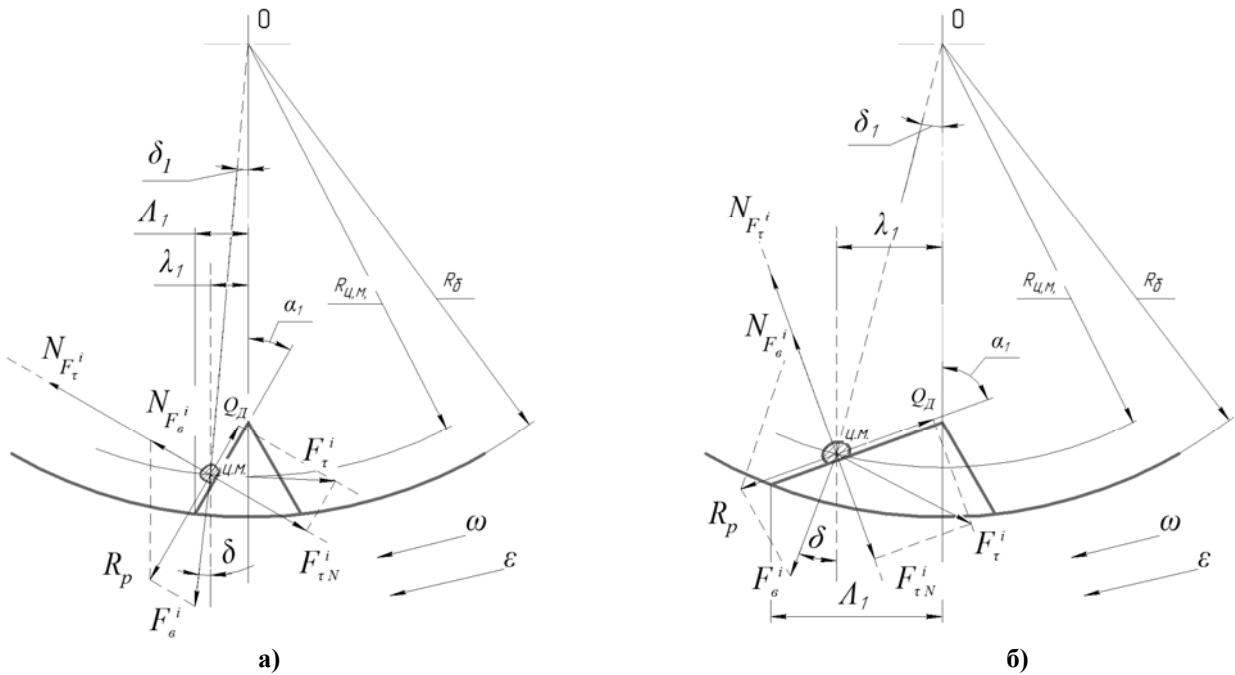


Рис. 2. Сили, які виникають при прискореному обертанні барабану

λ_1 – відстань центра ваги розглянутого взаємодіє з гребенем елемента оброблюваного матеріалу до радіальної площини, яка проведена через вершину гребеня;

Λ_1 – відстань від лінії сполучення поверхонь обичайки барабану і набігаючої бічної грані гребеня до радіальної площини, яка проведена через вершину гребеня;

δ – кут між радіус-вектором, проведеним від осі обертання барабану до центру тяжіння розглянутого елемента оброблюваного матеріалу, і радіальної площиною, яка проведена через вершину гребеня. Його величина визначається співвідношеннями:

$$\delta = \arcsin \frac{\lambda_1}{R_{ц.м.}}, \quad 0 \leq \delta \leq \arcsin \frac{\Lambda_1}{R_\sigma}$$

На даний умовно виділений елемент оброблюваного матеріалу при прискореному обертанні барабану в початковому періоді здійснення відцентрового віджимання діють наступні сили (силою тяжіння \bar{P} даного елемента нехтуємо):

\bar{F}_σ^i – відцентрова складова сили інерції

$$F_\sigma^i = m\omega^2 R_{ц.м.};$$

\bar{F}_τ^i – дотична складова сили інерції

$$F_\tau^i = m\epsilon R_{ц.м.};$$

$\bar{N}_{F_\sigma}^i$ та $\bar{N}_{F_\tau}^i$ – відповідно, складові нормальної реакції поверхні бічної грані гребеня від тиску на неї розглянутого умовно виділеного елемента оброблюваного матеріалу під дією сил \bar{F}_σ^i та \bar{F}_τ^i

$$N_{F_\sigma}^i = F_\sigma^i \cos(90^\circ - \alpha_1 + \delta)$$

$$N_{F_\tau}^i = F_\tau^i \sin(90^\circ - \alpha_1 + \delta)$$

$\bar{F}_{тер.зр.}$ – гранична сила тертя ковзання

$$F_{тер.зр.} = f_0(N_{F_\sigma}^i + N_{F_\tau}^i)$$

де f_0 – статичний коефіцієнт тертя оброблюваного матеріалу по поверхні бічної грані гребеня;

\bar{Q}_δ – сила, що переміщує розглянутий умовно виділений елемент оброблюваного матеріалу по поверхні бічної грані гребеня, що набігає на матеріал при прискореному обертанні барабану

$$Q_\delta = F_\tau^i \cos(90^\circ - \alpha_1 + \delta)$$

$\bar{Q}_\sigma = \bar{F}_{тер.зр.} + \bar{F}_p$ – сила, яка протидіє переміщенню даного елемента по поверхні набігаючої

бічної грані гребеня, де \bar{R}_p – рівнодіюча сил \bar{F}_τ^i та \bar{F}_τ^i

$$Q_\tau = f_0 \left(N_{\bar{F}_\tau^i} + N_{\bar{F}_\tau^i} \right) + F_\tau^i \sin(90^\circ - \alpha_1 + \delta)$$

Для переміщення елемента оброблюваного матеріалу, який розглядається, по поверхні бокової грані гребеня необхідно забезпечити умову

$$Q_\tau > Q_\tau$$

або

$$F_\tau^i \cos(90^\circ - \alpha_1 + \delta) > f_0 F_\tau^i \cos(90^\circ - \alpha_1 + \delta) + f_0 F_\tau^i \sin(90^\circ - \alpha_1 + \delta) + F_\tau^i \sin(90^\circ - \alpha_1 + \delta)$$

Звідси

$$F_\tau^i - f_0 F_\tau^i > (F_\tau^i + f_0 F_\tau^i) \operatorname{tg}(90^\circ - \alpha_1 + \delta)$$

та

$$\operatorname{tg}(90^\circ - \alpha_1 + \delta) < \frac{F_\tau^i - f_0 F_\tau^i}{F_\tau^i + f_0 F_\tau^i}$$

З даної нерівності знаходимо, що переміщення матеріалу через гребені буде здійснюватись при виконанні наступного співвідношення

$$90^\circ - \alpha_1 + \delta < \operatorname{arctg} \frac{\varepsilon}{\omega^2}$$

звідки

$$\alpha_1 > \operatorname{arctg} \frac{\varepsilon}{\omega^2} + \delta$$

Найбільша величина кута δ залежить від співвідношення розмірів основи поперечного перерізу гребеня і обичайки барабану. Для максимального значення δ отримуємо

$$\alpha_1 > \operatorname{arctg} \frac{\varepsilon}{\omega^2} + \operatorname{arcsin} \frac{\Lambda_1}{R_\tau}$$

При збільшенні кута нахилу бічної грані гребеня, яка є набігаючою, при рівних значеннях ω , ε , та m зростає сила \bar{Q}_τ , що переміщує матеріал по поверхні цієї бічної грані, і, водночас зменшується та протидіє переміщенню матеріалу сила \bar{R}_p .

Величина кута α_1 визначається співвідношенням значень параметрів, і, в загальному випадку не обмежується (може доходити до 90° і більше). У той самий час, при великих кутах нахилу бічних граней, без зменшення висоти гребенів маємо зменшення корисного внутрішнього об'єму барабану через збільшення об'єму, що займається цими гребенями. Тому при конструктивному виконанні асиметричних гребенів доцільно величину кута α_1 обмежувати $70\text{--}75^\circ$, що доведено експериментальними дослідженнями.

Висновки

Проведено аналіз взаємодії гребенів і обичайки барабану з оброблюваним матеріалом при прискореному обертанні барабану в початковому періоді відцентрового віджимання. Отримано взаємозв'язок параметрів геометричної форми гребенів барабану і режиму його обертання, що дозволяє знаходити раціональне їх співвідношення і, тим самим, підвищувати ефективність віджимання.

Література

1. Петко І. В. Електропобутова техніка / І. В. Петко, О. П. Бурмістенков, Т. Я. Біла, М. Є. Скиба. – Хмельницький : ХНУ, 2017. – 213 с.
2. Петко І.В. Аналіз механічного впливу на матеріал під час обробки в барабані з гребенями, що обертається / І.В. Петко, О.М. Усольцев // Вісник Технологічного університету Поділля. – Хмельницький : ТУ Поділля, 2000. – № 5. – Частина І. – С. 30–32.
3. Нагорный П.И. Управление распределением отжимаемого белья в барабане стиральной машины путём изменения конструкции барабана / П.И. Нагорный, А.М. Усольцев, Б.Б. Мальцев, Л.В. Мельник // Исследование и разработка нового поколения машин и приборов для быта. – М. : ЦНИИТЭИлепишемаш, 1983. – С. 43–50.
4. Патент України на корисну модель № UA88018. Барабан прально-віджимної машини / Гузенко Ю. М. – 25.02.14, Бюл. № 4.
5. Кіницький Я.Т. Теорія механізмів і машин : підручник / Кіницький Я.Т. – Київ : Наукова Думка,

2002. – 659 с.

6. А. с. 1025765 СССР, МКИ D 06 F 37/04. Барабан стирально-отжимной машины / Л.В. Мельник, П.И. Нагорный, А.М. Усольцев, Б.Б. Мальцев, И.П. Радченко (СССР). – № 3303090/28-12 ; заявлено 18.06.81 ; опубл. 30.06.83, Бюл. № 24. – 3 с.

7. Теоретична механіка : підручник / Булгаков В. М., Яременко В. В., Черниш О. М., Березовий М. Г. – Київ : Центр навчальної літератури, 2017. – 640 с.

8. А. с. 986993 СССР, МКИ D 06 F 37/04. Барабан для стирально-отжимной машины / Л.В. Мельник, А.М. Усольцев, Б.Б. Мальцев, П.И. Нагорный, И.П. Радченко (СССР). – № 3321153/29-12 ; заявлено 10.07.81 ; опубл. 07.01.83, Бюл. № 1. – 4 с.

9. Орчинский С. В. Влияние геометрии гребней барабану стирально-отжимной машины на ее функциональные и эксплуатационные показатели / С. В. Орчинский, А. М. Усольцев, И. И. Исаенко // Производственно-технический опыт. – М. : ЦНТИ «Поиск», 1989. – № 8. – С. 99–101.

References

1. Petko I. Electrical Appliances / I. V. Petko, O. P. Burmistenkov, T. Ya. Bila, M. Y. Skyba. – Khmelnytsky: KhNU, 2017. – 213 p.
2. Petko I.V., Usoltsev O.M. Analysis of the mechanical influence on the material during processing in a drum with rotating combs // Bulletin of the Technological University of Podillya: Scientific journal. – Khmelnytsky, TU Podillya, 2000. – No. 5. – Part I. – P. 30–32.
3. Nagorny P.I., Usoltsev A.M., Maltsev B.B., Melnyk L.V. Management of the distribution of pressed linen in the drum of the washing machine by changing the design of the drum // Research and development of a new generation of machines and appliances for everyday life. – Moscow: TsNITIEIleppilishchemash, 1983. – P. 43–50.
4. Guzenko Yu. M. Drum of a washing-machine. Patent of Ukraine for Utility Model №UA88018 of February 25, 14, Bull. № 4.
5. Kynitsky Ya.T. Theory of Mechanisms and Machines. Textbook. – Kyiv: Naukova Dumka, 2002. – 659 p.
6. s. 1025765 USSR, MKI D 06 F 37/04. Drum of the washing-pressing machine / L.V. Melnik, P.I. Nagorny, A.M. Usoltsev, B.B. Maltsev, I.P. Radchenko (USSR). – No. 3303090 / 28-12; Claimed 18/06/81; Pubwished Jun 30, 8, Bull. No. 24. – 3 s.
7. Bulgakov V.M., Yaremenko V.V., Chernysh O.M., Berezovsky M.G. Theoretical Mechanics. Textbook. – Kyiv: Center for Educational Literature, 2017. – 640.
8. s. 986993 USSR, MKI D 06 F 37/04. Drum for a washing-press machine / L.V. Melnik, A.M. Usoltsev, B.B. Maltsev, P.I. Nagorny, I.P. Radchenko (USSR). – № 3211113 / 29-12; Claimed 10.07.81; Pubwished 07/01/83, Bul. № 1. – 4 s.
9. Orchinsky S.V. Influence of the geometry of the crest of the drum of the washing-press machine on its functional and operational parameters / S.V. Orchinsky, A.M. Usoltsev, I.I. Isaenko // Production and technical experience. – Moscow: CSTI "Search", 1989. No. 8. – P. 99–101.

Рецензія/Peer review : 5.3.2019 р. Надрукована/Printed :10.4.2019 р.

Рецензент: д. т. н., проф. Бурмістенков О. П.

Н. Р. ВЕСЕЛОВСЬКА, О. І. МАЛАКОВ, С. А. БУРЛАКА
Вінницький національний аграрний університет

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СИЛОВОГО ВПЛИВУ НА РОБОЧІ ОРГАНИ І ПРИВОДИ ЗЕРНОЗБИРАЛЬНИХ КОМБАЙНІВ

Метою досліджень є вивчення динаміки навантажень на робочі органи і виконавчі механізми зернозбиральних комбайнів, використовуючи різні методики. У процесі досліджень силових впливів на робочі органи і приводи зернозбиральних комбайнів були розроблені схеми установки перетворювачів механічних величин (силових впливів) в електричні. Поряд з цим за вказаними методами було проведено вибір застосовуваної апаратури, представлена оцінка похибок вимірювань і обґрунтування плану виконання випробувань, що забезпечують достовірність результатів. Досліджувалися зернозбиральні комбайни з гідравлічним приводом. Експериментальні дослідження силового впливу на робочі органи і приводи зернозбиральних комбайнів проводилися на полях відповідно до методик, які включали порядок проведення досліджень, вибір застосовуваної апаратури, оцінку похибок вимірювань, обґрунтування плану проведення випробувань, що забезпечують достовірність результатів, агрооцінку фону і технологічного процесу. В результаті експериментальних досліджень отримані такі параметри, як крутний момент, що діє на обертові робочі органи (молотильний барабан, мотовила і ротори зернозбиральних комбайнів, ротори, подрібнювачі кормозбиральних комбайнів, трав'яних косарок, зернові і колосові шнеки). Вимірювалися крутний момент на ведучих колесах зернозбиральних, кормозбиральних комбайнів і тракторів сільськогосподарського призначення. На підставі отриманих результатів зроблено висновок про те, що динаміка навантажень на робочі органи і виконавчі механізми зернозбиральних комбайнів в більшості випадків має нелінійний характер, а силові і енергетичні параметри зернозбиральних комбайнів в робочих режимах руху з невеликими швидкостями помітно нижчі, ніж в транспортних режимах з більш високими швидкостями, цю обставину необхідно враховувати під час проектування гідромеханічних трансмісій зернозбиральних комбайнів.

Ключові слова: гідравлічний привід, кінематичні параметри, статистичні характеристики, проектування гідромеханічних трансмісій, процеси навантаження робочих органів.

N. R. VESELOVSKA, O. I. MALAKOV, S. A. BURLAKA
Vinnytsia National Agrarian University

EXPERIMENTAL STUDIES OF THE POWER IMPACT ON WORKING BODIES AND DRIVES OF COMBINE HARVESTERS

The aim of research was to study the loading dynamics on the working bodies and actuator mechanisms of combine harvesters. In the process of research of force impacts on the working bodies and drives of combine harvesters installation schemes of transducers of mechanical quantities (force impacts) into electrical ones have been designed. Along with this, by above procedures the choice of acquired equipment has been performed, error estimation evaluation and justification of performance test plan ensuring the accuracy of results, as well as background agri-estimation and technological process have been done. Harvester combines with hydraulic drive were investigated. Experimental studies of force influence on the working bodies and actuators of grain harvesters were carried out on fields in accordance with the methods. These techniques included the procedure for conducting research, the choice of equipment used, the measurement errors, the substantiation of the test plan that ensure the reliability of the results, as well as the agro-assessment of the background and the technological process. As a result of experimental studies such parameters as torque acting on the rotating working bodies (threshing drum, reel and rotors of combine harvesters, rotors and shredders of forage harvesters, grass mowers, grain and tailing screws) have been obtained. Torques on the drive wheels of grain, forage harvesters and tractors for agricultural purposes have been measured. On the basis of the obtained results a conclusion is made that the loading dynamics on the working bodies and actuators of combine harvesters in the majority of cases have a non-linear character, and the power and energy parameters of combine harvesters in the operating modes of motion at low speed is much lower than in the transport modes with a higher speed, and this fact must be considered when designing hydromechanical transmissions of combine harvesters.

Keywords: hydraulic drive, kinematic parameters, statistical characteristics, the design of hydromechanical transmission, the process of loading of the working bodies.

Вступ

Одним з напрямків підвищення енергонасиченості складних сільськогосподарських машин є заміна механічних передач для приводу робочих органів гідравлічними. Створення конкурентоспроможних на світовому ринку сільськогосподарських машин є актуальним завданням, тому рішення цього завдання в першу чергу пов'язано з питаннями підвищення надійності. Стає неможливим експлуатувати зернозбиральні комбайни, у яких 50% робочого часу доводиться на простої, пов'язані з недостатнім технічним рівнем і низькою надійністю. Слід зазначити низьку надійність елементів приводів, так як при експлуатації сучасних сільськогосподарських машин 30% відмов припадає на цю групу механізмів [1].

Однак гальмом повної гідрофікації сільськогосподарських машин є відставання вітчизняної промисловості в області виробництва гідронасосів і гідромоторів необхідної потужності і недостатній ресурс їх експлуатації. Але не менш важливою причиною відсутності таких машин є те, що практично немає досліджень складних просторових гідропроводів і, отже, методик їх розрахунку та проектування [1, 2].

В останні роки для приводу ходової частини в зарубіжних і вітчизняних самохідних сільськогосподарських машинах, а також при агрегуванні енергонасиченого трактора з машинами і

знаряддями, що мають активні робочі органи, все більше застосовується гідрооб'ємний привід. Серед зарубіжних фірм, широко застосовують трансмісії з гідрооб'ємним приводом, слід зазначити такі, як International Harvester, Allis Chaimers, John Deere, Claas, Deutz Fahz, Massey-Ferguson [2].

Як відомо, гідрооб'ємний привід має ряд істотних переваг перед кліноременевим варіатором: велику здатність компонування, можливість передачі великої потужності, широкий діапазон безступінчастого регулювання швидкості комбайна (реверсування), довговічність і надійність, що важливо під час проектування і створення мобільних сільгоспмашин.

Мета і задачі роботи

Об'єкт досліджень – зернозбиральні комбайни з гідравлічним приводом. Експериментальні дослідження силового впливу на робочі органи і приводи зернозбиральних комбайнів проводилися на полях відповідно до методик. Ці методики включали порядок проведення досліджень, вибір застосовуваної апаратури, оцінку похибок вимірювань, обґрунтування плану проведення випробувань, що забезпечують достовірність результатів, а також агрооцінку фону і технологічного процесу.

Аналіз останніх досліджень

Дослідженнями С. А. Алфьорова, Ю. В. Гринькова, Л. М. Грошева, В. В. Радіна, І. В. Ігнатенко, А. А. Тумакова, С. А. Юніченко, В. Б. Альчина, В. І. Майстренко, Н. П. Погорелова, В. К. Аснача встановлено, що надійність елементів конструкцій сільськогосподарських машин тісно пов'язана з динамічними явищами, супутніми функціонуванню машини. Досвід експлуатації авіаційної, верстатної і сільськогосподарської техніки показує, що значний відсоток відмов у роботі обумовлений руйнуванням з'єднань трубопроводів. Отже, з'єднання трубопроводів – найбільш слабка ланка в гідравлічних системах машин. Тому дослідження умов роботи сільгоспмашин і тракторів є однією з важливих і актуальних завдань сучасного машинобудування і дає можливість моделювати процеси, що відбуваються в гідросистемах на стадії проектування, а також створювати надійні конструкції з'єднання трубопроводів [3–5].

У зв'язку з цим метою досліджень було вивчення динаміки навантажень на робочі органи і виконавчі механізми зернозбиральних комбайнів.

Виклад основного матеріалу

Розробку оптимального плану експериментальних досліджень покажемо на прикладі дослідження крутного моменту, що виникає на молотильному барабані зернозбирального комбайна. З урахуванням ефектів

впливу різних параметрів на середнє значення крутного моменту було прийнято рівняння регресії:

$$M_B = a_0 + a_1q + a_2\lambda + a_3w + a_4q\lambda + a_5qw + a_6w\lambda, \quad (1)$$

де – крутний момент барабана, $кНм \cdot м$;

$a_{0,1,2,3,5,6}$ – коефіцієнт функції доступу;

q – подача хлібної маси, $кг/с$;

w – середня вологість хлібної маси, %;

λ – зазор між бичами і підбарабанням на вході молотильного агрегату, $м$

Повний факторний експеримент типу 2^3 повинен містити мінімальну кількість дослідів $N_{нф}=8$. Характеристика дослідів за таким факторним експериментом для різних можливих технологічних режимів представлена в таблиці 1.

Таблиця 1

Характеристика чинників в технологічних режимах роботи комбайна ACROS 550

Рівень фактору	Кодове значення	Фактор		
		q , $кг/с$	$\lambda \cdot 10^2$, $м$	w , %
Базовий	0	3,5	8	26
Верхній	+	6,0	16	28
Нижній	-	1,0	24	30
Інтервал варіювання		2,5	8	2

Таблиця 2

Характеристика чинників для транспортних режимів комбайна ACROS 550

Рівень фактору	Кодове значення	Фактор		
		Макроуклін поля α , градуси	Швидкість V , $м/с$	Заповнення бункера, %
Базовий	0	4	1,8	75
Верхній	+	8	3,0	100
Нижній	-	0	0,6	50
Інтервал варіювання		4	1,2	25

Аналогічно був побудований план факторного експерименту з метою встановлення рівняння

регресії для крутного моменту на ведучому колесі зернозбирального комбайна ACROS 550 для транспортних режимів. Характеристика факторів для транспортних режимів комбайна ACROS 550 представлена в таблиці 2.

За результатами дослідів з молотильним барабаном спочатку була досліджена модель першого порядку виду:

$$M_B = a_0 + a_1q + a_2\lambda + a_3w = 258 + 95,28q + 58,25\lambda + 14,25w. \quad (2)$$

Як бачимо, найбільший вплив робить фактор q (подача хлібної маси). Оцінка значущості коефіцієнтів регресії показала, що всі коефіцієнти статично значущі. Оцінка адекватності моделі (2) за критерієм Фішера показала, що:

$$F_{\text{табл}} = 36007 \leq F_{\text{розр}} = 3,5.$$

Отже, модель (2) неадекватно описує експериментальний матеріал, пошук адекватної функції за допомогою стандартних програм привів до моделі (1):

$$M_B = -241,2 + 137,2q + 129,2\lambda + 2,2\omega + 120,8q\lambda + 0,1q\omega + \omega\lambda. \quad (3)$$

Використання нелінійної моделі (3), отриманої на основі факторного експерименту, значно підвищує точність апроксимації. Коефіцієнт множинної кореляції тут становить $R=0,99$.

Якість функціонування зернозбиральних комбайнів регламентується відповідними агротехнічними вимогами. Реалізація цих вимог в умовах повної гідрофікації зернозбиральних комбайнів, природно, здійснюється їх гідравлічними приводами [6, 7].

Експериментальні дослідження проводилися з метою вирішення таких основних завдань:

- отримати матеріал по навантаженнях на робочі органи і виконавчі механізми зернозбиральних комбайнів;
- систематизувати отриманий в ході експериментів матеріал і сформувати базу даних по навантаженнях в гідросистемах зернозбиральних комбайнів.

В ході експериментів реєструвалися такі основні параметри: крутний момент, що діє на обертові робочі органи (молотильний барабан, мотовило, зерновоз і колосковий шнек) та крутний момент на ведучих колесах комбайна. Для вимірювання цих параметрів в ході досліджень використовувалися тензовали, тензошків, тензомуфти, а при вимірі сил, що діють на об'єкти зворотно-поступальної дії (ріжучі апарати, штоки гідроциліндрів), тензометричні вставки, а саме тензоманометри або тензометри. Для оперативного отримання навантажувальних характеристик застосовувалися тензометричні підсилювачі і магнітоелектричні осцилографи, комп'ютерна техніка, тензостанції, а кутові і лінійні швидкості оцінювалися за допомогою тахогенераторів, індуктивних датчиків імпульсів.

Експериментальні дослідження навантаження різних сільськогосподарських машин показали, що більшість процесів навантаження їх робочих органів і механізмів є нестационарними випадковими. У зв'язку з цим під час обробки експериментального матеріалу виявилось доцільним на окремих відрізках кількості зібраного врожаю центрувати ці процеси і окремо розглядати постійну складову, а змінну відносити до стаціонарних випадкових процесів [8, 9].

При цьому залежність середніх значень навантажень і кінематичних параметрів від режимів та умов експлуатації зернозбиральних комбайнів визначалася за допомогою методів планування експериментів. Статистичні характеристики випадкового навантаження отримані за допомогою методів обробки експериментального матеріалу з позицій теорії стаціонарних випадкових процесів.

На рис. 1 і 2 представлені типові графіки і осцилограми перехідних процесів крутних моментів і зусиль, що виникають у виконавчих механізмах зернозбиральних комбайнів ACROS 550.

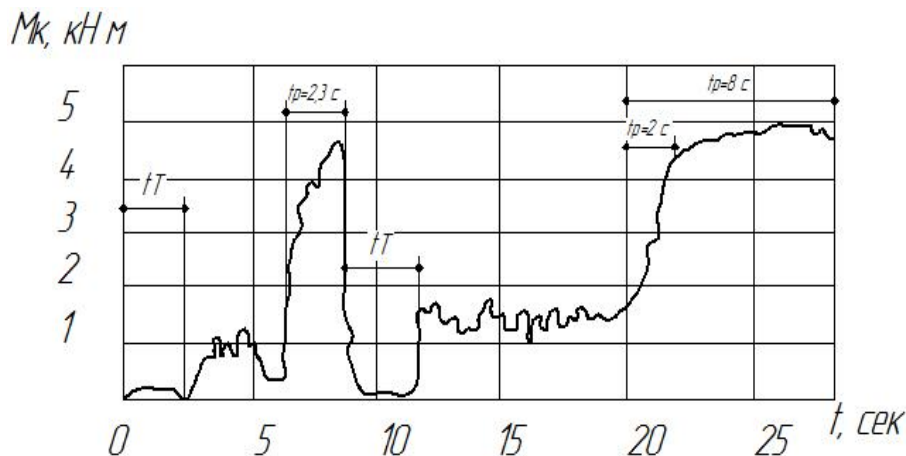


Рис. 1. Графік перехідних процесів в механізмі приводу під час руху по пересіченій місцевості

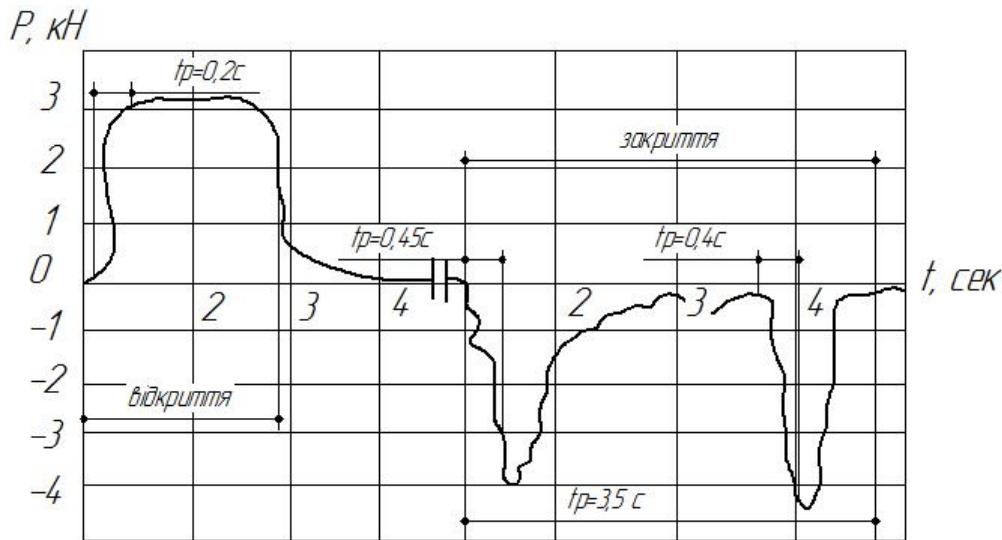


Рис. 2. Зміна зусилля на штоку гідроциліндра копачника

З осцилограм процесу пуску були визначені також коефіцієнти динамічності навантаження (K_d) як відношення максимального моменту (M_{max}) або сили (P_{max}) у виконавчому механізмі до середнього значення цих параметрів (M_c і P_c) в період сталого руху при виконанні технологічного процесу:

$$K_d = \frac{M_{max}}{M_c} \text{ або } K_d = \frac{P_{max}}{P_c}.$$

У зв'язку з тим, що M_c і P_c залежать від параметрів технологічних процесів, що виконувалися машиною (швидкості пересування, глибини обробітку ґрунту, зазорів в молотильному барабані тощо), в таблиці 3 представлені значення K_d з урахуванням властивостей параметрів.

Таблиця 3

Параметри динамічних навантажень

Назва механізму	Коефіцієнт динамічного навантаження K_d	Швидкість зростання пускового навантаження V_n , кН*м/с
Момент на ходовому колесі зернозбирального комбайна	2,25-3,50	2,5-3,5
Момент на ходовому колесі машинно-тракторних агрегатів	3,5-4,5	2,5-3,0
Момент на молотильному барабані зернозбирального комбайна (класична схема)	3,5-4,0	3,5-5,5
Момент на молотильному барабані зернозбирального комбайна (роторний варіант)	5,5-6,0	4,5-6,5
Момент на фрезі культиватора	1,5-2,0	6,5-8,5

Якщо позначити швидкість росту пускового навантаження V_n , то в загальному випадку можна записати:

$$V_n(t) = \frac{dM(t)}{dt} \text{ або } V_n(t) = \frac{dP(t)}{dt}. \tag{4}$$

Так як аналітичні вирази для $M(t)$ і $P(t)$ в ряді випадків отримати важко, диференціювання в формулах (4) розраховувалися чисельно, в кінцевих інтервалах:

$$V_{ni} = \frac{\Delta M_i}{\Delta t} \text{ або } V_{ni} = \frac{\Delta P_i}{\Delta t},$$

де ΔM_i , і ΔP_i – приріст силових факторів на i -й ділянці;

Δt – обраний інтервал, а саме інтервал квантування часу.

Інтервал Δt вибирався з таким розрахунком, щоб визначити не менше десяти значень V_{ni} , тому обчислення V_{ni} дозволило отримати максимальну величину зростання швидкості пускового навантаження V_{nmax} (таблиця 3).

Аналіз осцилограм перехідних процесів показав, що їх тривалість залежить від пружно-дисипативних характеристик гідромеханічних систем зернозбиральних комбайнів. При цьому тривалість

наростання навантаження становить від 2 до 13% загального часу процесу.

Параметри силових впливів в механізмах при сталих режимах їх функціонування розглянуті окремо в залежності від виду руху, що здійснюється їх виконавчими ланками: поступального, обертального, зворотно-поступального [10–13].

На рисунку 3 представлені як приклад графіки зміни крутного моменту M_k в приводі ріжучого апарату зернозбирального комбайна ACROS 550 залежно від подачі ножа h .

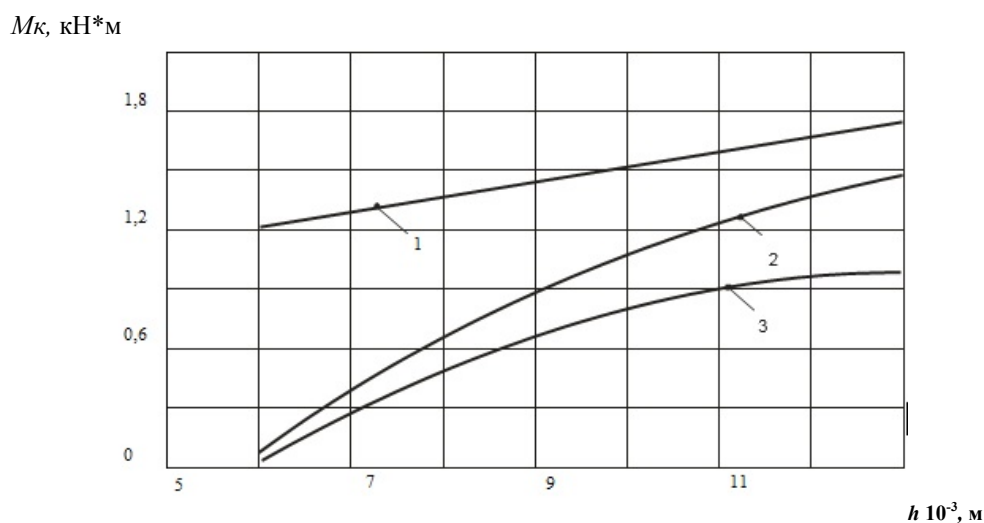


Рис. 3. Графіки зміни крутного моменту в приводі ріжучого апарату зернозбирального комбайна ACROS 550

Середні значення крутних моментів на ходових колесах зернозбирального комбайна ACROS 550 представлені в таблиці 4. В ній вказані середні значення на одному ходовому колесі, а також сумарна потужність, витрачена тільки на пересування комбайна.

Таблиця 4

Середні значення на ходових колесах зернозбирального комбайна ACROS 550

Маса при повному навантаженні, кг	Характеристика агрофону		Швидкість руху V , м/с	Момент на ходовому колесі M_k , кН*м	Потужність, що затрачається на пересування N , кВт
	Вид	Кут підйому, град.			
17800	Стерня	$\pm 0,3$	0,83-1,40	8,0-9,0	6,5-17,0
	Стерня	$\pm 6,5$	0,75-2,25	25,2-28,7	17,5-71,0
	Стерня	$\pm 8,0$	0,86-1,47	24,6-34,5	47,0-75,5
	Стерня	$\pm 0,3$	2,80-3,10	9,0-12,8	20,0-36,0

Експерименти проводилися при повному завантаженні бункера комбайна і русі по стерні з різним ухилом поля (враховувався мікрорельєф), а також по дорозі на різних швидкостях руху.

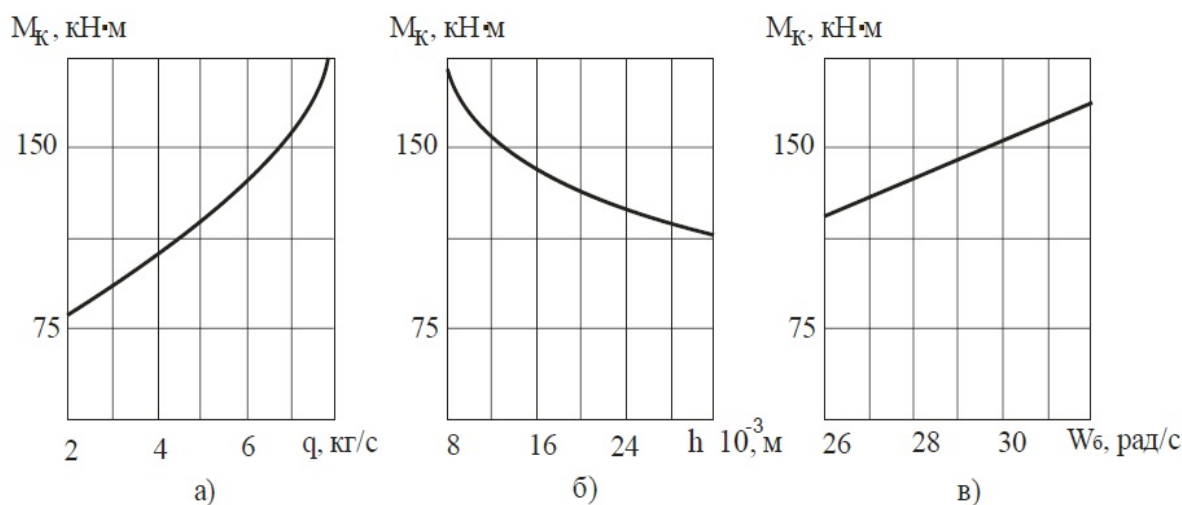


Рис. 4. Залежність крутного моменту M_k на молотильному барабані зернозбирального комбайна ACROS 550: а – від подачі хлібної маси q ; б – зазору між бичами і підбарабанням h ; в – окружної швидкості бичів W_b

Аналіз результатів, наведених у таблиці 4, показує, що силові і енергетичні параметри зернозбиральних комбайнів в робочих режимах руху з невеликими швидкостями помітно нижчі, ніж в транспортних режимах з більш високими швидкостями. Отримані дані доцільно враховувати при проектуванні гідромеханічних трансмісій зернозбиральних комбайнів.

Характер зміни крутного моменту на молотильному барабані зернозбирального комбайна ACROS 550 показано на рис. 4.

Залежність крутного моменту на мотовилі зернозбирального комбайна ACROS 550 від зміни ставлення швидкості мотовила V_m до швидкості руху комбайна V_k показана на рис. 5.



Рис. 5. Графік зміни крутного моменту на мотовилі зернозбирального комбайна ACROS 550 при зміні ставлення швидкості мотовила V_m до швидкості комбайна V_k

Висновки

1. Вплив різних технологічних параметрів на середні значення процесів навантаження об'ємного гідравлічного приводу зернозбиральних комбайнів носить в більшості випадків нелінійний характер.
2. Зі збільшенням ширини захвату жатки, подачі маси в молотильний апарат середні значення силових факторів зростають.
3. Середні значення крутного моменту і потужності на ходовому колесі в робочих режимах руху комбайна істотно нижчі, ніж в транспортних.
4. Зі збільшенням швидкості руху зернозбиральних комбайнів і висоти нерівностей рельєфу поля середні значення навантажень на штоках гідроциліндрів механізмів позиціонування зернозбиральних комбайнів збільшуються. При дворазовому збільшенні швидкості руху комбайна навантаження на штоках гідравлічних циліндрів збільшуються в 1,2-1,5 разу.
5. Спектр навантажень в механізмах приводу на хід зернозбиральних комбайнів істотно залежить від агрофону і відрізняється при переміщенні по стерні.
6. Отриманий в результаті експериментальних досліджень матеріал і систематизація динамічних навантажень в виконавчих механізмах зернозбиральних комбайнів може бути використаний при проектуванні, розрахунках і виборі форм робочих органів ґрунтообробних машин, а також розробці заходів і рекомендацій щодо підвищення надійності гідравлічних систем комбайнів.

Література

1. Основи проектування сільськогосподарських машин: підручник / [Ю. І. Ермольєв, А. Д. Чистяков, В. А. Андросов, А. А. Баранов, А. І. Вальтер] ; під ред. Ю. І. Ермольєва. – Тула: Гріфік, 2006. – 604 с.
2. Комбайни очами випробувача [Електронний ресурс] // The Ukrainian Farmer. – 2014. – № 6. – Режим доступу : http://www.agrotimes.net/journals/article/kombajni_ochami_viprobuvacha.
3. Білоусько Я.К. Техніко-технологічне забезпечення сільського господарства / Я.К. Білоусько // Економіка АПК. – 2009. – №12. – С. 29–33.
4. Геєць В.М. Стратегічні виклики XXI століття суспільству та економіці України: Інноваційно-технологічний розвиток економіки / В.М. Геєць, В.П. Семиноженко, Б.С. Кваснюк. – К. : Фенікс, 2007. – 564 с.
5. Кононенко, М.П. Обґрунтування оптимізації нормативних витрат на виробництво сільськогосподарської продукції / М.П. Кононенко // Економіка АПК. – 2009. – № 6. – С. 32.
6. Аналіз технологій заготівлі сіна та сінажу / В. П. Комаха, С. А. Бурлака, І. М. Копчук, Р. О. Яцковська. // Сільське господарство та лісівництво. – 2018. – № 11. – С. 123–131.
7. Малаков, О. І. Зниження навантаження елементів конструкції моста керованих коліс самохідної косарки шляхом раціональної установки гідроциліндрів / О. І. Малаков, С. А. Бурлака, Р. О. Ярошук //

Вісник Хмельницького національного університету. – 2018. – № 4. – С. 56–62.

8. Комплексна програма розвитку сільського господарства Житомирської області у 2009–2010 роках та на період до 2015 року / М.М. Дейсан [та ін.]. – Житомир : Рута, 2009. – 304 с.

9. Лукінов І.І. Вибрані праці : у 2 кн. Кн. 2 / І.І. Лукінов. – К. : ННЦ ІАЕ, 2007. – 794 с.

10. Мазнев Г.Є. Методичний підхід щодо обґрунтування територіального розміщення ремонтно-обслуговуючих підприємств / Г.Є. Мазнев // Економіка АПК. – 2019. – № 11. – С. 102–108.

11. Наукові основи агропромислового виробництва в зоні Полісся і західного регіону України / редкол. : В.М. Зубець [та ін.]. – К. : Урожай, 2004. – 560 с.

12. Підлісецький Г.М. Економічні проблеми технічного забезпечення сільського господарства / Г.М. Підлісецький // Економіка України. – 2008. – №11. – С. 81–87.

13. Саблук П.Т. Агропромисловий комплекс в системі зовнішньоекономічної діяльності України / П.Т. Саблук, А.А. Фесина, В.І. Власов та ін. – К. : ННЦ ІАЕ, 2005. – 242 с.

References

1. Fundamentals of designing agricultural machines: textbook / Yu.I. Ermoliev, A.D. Chistyakov, V.A. Androsov, A.A. Baranov, A.I. Walter; ed. Yu. I. Yermoleva. – Tula: Griffik, 2006. – 604 p.

2. Combines with the eyes of the test [Electronic resource] // The Ukrainian Farmer. – 2014. – № 6. URL: http://www.agrotimes.net/journals/article/kombajni_ochami_viprobuvača.

3. Belousko Ya.K. Technical and technological support of agriculture / Ya.K. Belousky // Economy of agroindustrial complex. – 2009. – № 12. – P. 29–33.

4. Geets VM Strategic Challenges of the XII Century Society and Economy of Ukraine: Innovative Technological Development of the Economy / V.M. Heyets, V.P. Seminozhenko, B.S. Kvasnyuk. – K. : Phoenix, 2007. – 564 pp.

5. Kononenko M.P. Substantiation of optimization of standard costs for agricultural production / M.P. Kononenko // Economy of agroindustrial complex. – 2009. – No. 6. – P. 32.

6. Analysis of technologies of hay and hay harvesting / V.P. Komakh, S.A. Burlak, I.M. Kopchuk, R.O. Yatskovskaya // Agriculture and forestry. – 2018. – №11. – P. 123–131.

7. Malakov O. I. Reduction of the structural elements of the bridge of the controlled wheels of the self-propelled mower by the rational installation of the hydraulic cylinders / O. I. Malakov, S. A. Burlak, R. O. Yaroshchuk. // Bulletin of the Khmelnitsky National University. – 2018. – № 4. – P. 56–62.

8. Complex program of development of agriculture in Zhytomyr region in 2009-2010 and for the period till 2015 / M.M. Deissan [and others]. – Zhytomyr : Ruta, 2009. – 304 с.

9. Lukinov I.I. Selected works: in 2 books. / I.I. Lukinov. – Kn. 2. – K. : NSC IAE, 2007. – 794 p.

10. Maznev G.Ye. Methodical Approach to Grounding the Territorial Position of Repair and Service Enterprises / G. Ye. Maznev // Economy of the agroindustrial complex. – 2019. – No. 11. – P. 102–108.

11. Scientific fundamentals of agro-industrial production in the area of Polissya and the western region of Ukraine / redkol: V.M. Zubets [and others]. – K.: Harvest, 2004. – 560 p.

12. Pidysetskii G.M. Economic problems of agricultural technical support / G.M. Pidysetskij // Economy of Ukraine. – 2008. – No. 11. – P. 81–87.

13. Sabluk P.T. Agroindustrial complex in the system of foreign economic activity of Ukraine / P.T. Sabluk, A.A. Fesina, V.I. Vlasov and others. – K. : NSC IAE, 2005. – 242 p.

Рецензія/Peer review : 11.2.2019 р.

Надрукована/Printed : 10.4.2019 р.

Рецензент: д. т. н., проф. Анісімов В. Ф.

ІНГІБІТОРИ КОРОЗІЇ АЛЮМІНІЮ В ЛУЖНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

Алюміній та його сплави знайшли широке застосування у якості конструкційних матеріалів, носіїв для активних систем та як анодний матеріал для метал-повітряних елементів. У попередньому дослідженні встановлено, що ефективними інгібіторами корозії алюмінію в лужному середовищі є аліфатичні та ароматичні карбонові кислоти, і зокрема нафталінтетракарбонова кислота. У представленій роботі досліджено вплив на корозійну поведінку алюмінію в 1М NaOH неорганічних добавок – $(\text{NH}_4)_4\text{W}_5\text{O}_{17}\cdot 2,5\text{H}_2\text{O}$, Na_2SiO_3 , SnSO_4 . Визначено, що $(\text{NH}_4)_4\text{W}_5\text{O}_{17}\cdot 2,5\text{H}_2\text{O}$ та багатокомпонентний інгібітор 0,01М $\text{C}_{14}\text{H}_8\text{O}_8$ + 0,01М SnSO_4 + 0,1М Na_2SiO_3 можуть бути використані для корозійного захисту алюмінію при його застосуванні у якості конструкційного матеріалу у слаболужних та лужних середовищах. Для зниження швидкості самоочисної корозії Al аноду в алюміній-повітряних елементах слід рекомендувати двокомпонентну інгібіторну композицію 0,01М $\text{C}_{14}\text{H}_8\text{O}_8$ + 0,01М SnSO_4 . Ця композиція при помірному гальмуванні анодного процесу забезпечує розчинення алюмінію з постійною швидкістю і збільшення катодної поляризації.

Ключові слова: алюміній, лужне середовище, інгібітори корозії, поляризаційні криві, струм корозії.

YE. M. ZAVERACH, O. I. STREMETSKYI
Khmelnyskyi National University

CORROSION INHIBITORS FOR ALUMINIUM IN ALKALINE MEDIUM

Aluminium has excellent mechanical and physicochemical properties that make it the ideal material for a wide range of applications, especially as a construction material and as an anode material for power sources. The use of inhibitors is one of the best options of protecting aluminium and its alloys against corrosion. In our previous work the polarization measurements and the quantum-chemical calculations have been allowed to estimate the ability of aliphatic and aromatic carboxylic acids to inhibit the aluminium corrosion in alkaline solution. It has been established that naphthalenetetracarboxylic acid is most effective inhibitor. The inhibition efficiency of naphthalenetetracarboxylic acid has become weaker with decreasing of its concentration. The aim of the present research is to investigate influence of inorganic inhibitors and inhibition compositions which include organic and inorganic substances on corrosion characteristics of aluminium in alkaline medium. It was found that only $(\text{NH}_4)_4\text{W}_5\text{O}_{17}\cdot 2,5\text{H}_2\text{O}$ shows great influence on aluminium corrosion in 1M NaOH. Inhibition effect of Na_2SiO_3 and SnSO_4 was enhanced by the addition of 0,01M naphthalenetetracarboxylic acid. It was found that corrosion current of aluminium in 1M NaOH without additives was 3,162 mA/cm², introducing 0,1M $(\text{NH}_4)_4\text{W}_5\text{O}_{17}\cdot 2,5\text{H}_2\text{O}$ – 0,038 mA/cm², introducing inhibition composition 0,01M $\text{C}_{14}\text{H}_8\text{O}_8$ + 0,01M SnSO_4 + 0,1M Na_2SiO_3 – 0,063 mA/cm². So these inhibitors can be recommended for corrosion protection of aluminium in weakly alkaline and alkaline solutions. Composition 0,01M $\text{C}_{14}\text{H}_8\text{O}_8$ + 0,01M SnSO_4 can be used as inhibitor of aluminium self-corrosion for metal-air batteries. This composition can provide anodic dissolution of aluminum with stable rate and increasing of cathodic polarization.

Key words: aluminium, alkaline medium, corrosion inhibitors, polarization curves, corrosion current.

Вступ

Алюміній та його сплави мають цілий ряд відмінних фізико-механічних та технологічних властивостей: висока корозійна стійкість, теплопровідність, електрична провідність, жароміцність, міцність і пластичність при низьких температурах, проста процедура нанесення захисних і декоративних покриттів, легкість реалізації обробки різанням і зварюванням [1–3]. Це й обумовлює широке застосування алюмінію та його сплавів у якості конструкційних матеріалів та носіїв для активних систем різноманітного призначення. Достатньо негативний стандартний потенціал (-1,66 В) та висока гравіметрична й об'ємна ємність (відповідно 2,89 А-год/г та 8,04 А-год/см³) дозволяє розглядати алюміній як перспективний анодний матеріал для метал-повітряних елементів [4, 5]. Тому дослідження систем алюміній-водний (неводний) розчин лугу або солі має велике практичне значення. При застосуванні цих систем у процесах обробки поверхні металу чи у хімічних джерелах струму слід забезпечити такі умови, щоб алюміній не пасивувався, але при цьому його корозія повинна бути мінімальною.

У попередньому дослідженні було встановлено, що ефективними інгібіторами корозії алюмінію в лужному середовищі є багатоосновні аліфатичні та ароматичні карбонові кислоти [6]. Найбільше зростання катодної поляризації спостерігалось при введенні у 1М NaOH бурштинової, лимонної, нафталінтетракарбонової кислот, при цьому також гальмувався і анодний процес. Слід наголосити на тому, що нафталінтетракарбонова кислота $\text{C}_{14}\text{H}_8\text{O}_8$ проявляла інгібіторні властивості навіть при низьких концентраціях (0,01 моль/л). Щоб підсилити вплив $\text{C}_{14}\text{H}_8\text{O}_8$ на катодний процес при помірному гальмуванні анодного розчинення алюмінію слід застосувати додаткові добавки, зокрема неорганічні. Про більш високий інгібуючий ефект суміші двох добавок – органічної та неорганічної, в порівнянні з ефектом дії будь-якої з них окремо зазначається у роботах [7, 9]. Так, у [7] встановлено, що помітне інгібування процесу корозії алюмінію у лужному середовищі досягається при введенні іонів Ca^{2+} та 2,3-дигідроксибутандіонової (винної) кислоти. На основі літературних даних [4, 8 – 11] для дослідження були вибрані наступні неорганічні добавки: тетраамоній пентавольфрамат $(\text{NH}_4)_4\text{W}_5\text{O}_{17}\cdot 2,5\text{H}_2\text{O}$, натрій силікат Na_2SiO_3 , станум сульфат SnSO_4 .

Таким чином мета представленої роботи полягала у визначенні впливу неорганічних добавок на корозійну поведінку алюмінію у лужному середовищі, а також створенні багатокомпонентної інгібіторної

композиції, яка б знижувала самочинну корозію алюмінію, не призводячи до його пасивації.

Експериментальна частина

У дослідженнях використовували алюмінієву фольгу марки А99 товщиною 100 мкм, яка проходила попередню термічну обробку при 300 °С протягом 1 год. з наступним поступовим охолодженням. З фольги виготовляли робочі електроди у вигляді прапорців площею 2 см² зі струмовідводом шириною 2 мм та довжиною 25 мм. Поляризаційні виміри проводили у 1 М NaOH без та при наявності інгібіторних добавок: 0,01 М SnSO₄; 0,01 та 0,1 М (NH₄)₄W₅O₁₇·2,5H₂O; 0,1 М Na₂SiO₃. Деякі експерименти відбувались при введенні у розчин двокомпонентної 0,01М C₁₄H₈O₈ + 0,01М SnSO₄ та трьохкомпонентної інгібіторної добавки 0,01М C₁₄H₈O₈ + 0,01М SnSO₄ + 0,1М Na₂SiO₃. Безпосередньо перед поляризаційними вимірами електроди з алюмінію піддавали активації у 10% розчині NaOH при кімнатній температурі протягом 60 с.

Поляризаційні виміри виконували у трьохелектродній скляній комірці, яка містила алюмінієвий робочий та допоміжний платиновий електроди, а також хлорсрібний електрод порівняння. Значення стаціонарного потенціалу робочого електроду фіксували через 5 – 10 хв. після його занурення у досліджуваний розчин. Поляризаційні криві знімали при швидкості розгортки потенціалу 1 мВ/с з застосуванням потенціостату ПИ-50-1.1 в компоновці з програматором ПР-8 та двокоординатним реєстратором ПДА-1-01. Потенціали електродів представлені у стандартній водневій шкалі. При аналізі поляризаційних кривих встановлювали значення стаціонарного потенціалу корозії, E_{ст.}, та величини анодної, ΔE_{ан.}, і катодної, ΔE_{кат.}, поляризації при густині струму 5 мА/см². Корозійні показники – потенціал корозії E_{кор.} та струм корозії j_{кор.} знаходили при проведенні дотичних до тафелівських прямолінійних ланок залежностей потенціалу від логарифму густини струму, побудованих на основі даних поляризаційних вимірів.

Поляризаційні криві, одержані на алюмінієвих електродах у 1 М NaOH без (криві 1 та 1') та при наявності неорганічних інгібіторів (криві 2 – 5 та 2' – 5') представлені на рис. 1. Ефективність інгібіторів можна попередньо оцінити при порівнянні значень E_{ст.}, ΔE_{ан.} та ΔE_{кат.} у 1 М NaOH з тими, що спостерігались у цьому ж розчині при введенні інгібіторів (таблиця 1). У таблиці 1 також представлені E_{ст.}, ΔE_{ан.} та ΔE_{кат.} для лужного розчину з додаванням 0,01 та 0,1 М C₁₄H₈O₈.

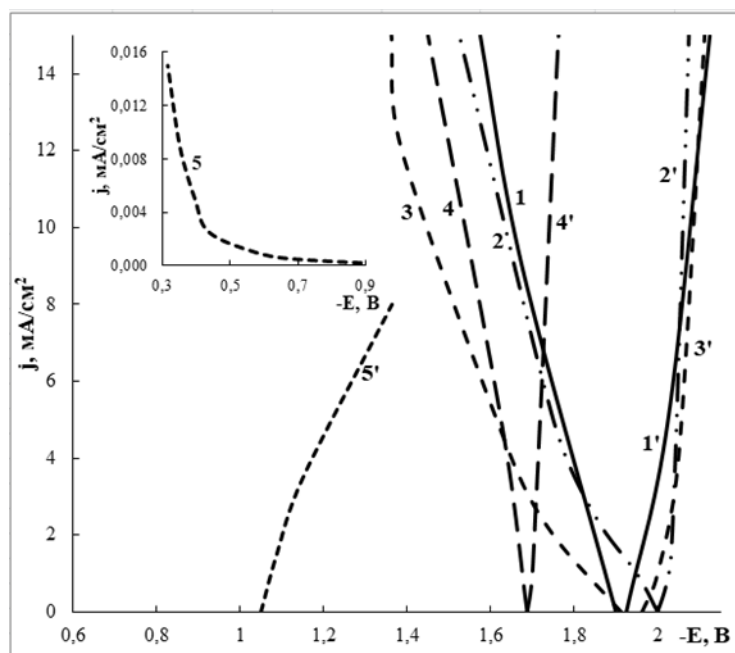


Рис. 1. Поляризаційні криві на електродах з алюмінію у 1 М розчині NaOH без (1, 1') та за наявності інгібіторів: 2, 2' – 0,01М SnSO₄; 3, 3' – 0,1М Na₂SiO₃; 4, 4' – 0,01 М (NH₄)₄W₅O₁₇·2,5H₂O; 5, 5' – 0,1 М (NH₄)₄W₅O₁₇·2,5H₂O

Таблиця 1

Значення E_{ст.}, ΔE_{ан.} та ΔE_{кат.} на електродах з алюмінію у досліджуваних розчинах

Розчин	E _{ст.} , В	ΔE _{ан.} , мВ	ΔE _{кат.} , мВ
1М NaOH	-1,940	140	-100
1М NaOH + 0,01 М SnSO ₄	-2,000	250	-50
1М NaOH + 0,1 М (NH ₄) ₄ W ₅ O ₁₇ ·2,5H ₂ O	-1,060	712,5	-162,5
1М NaOH + 0,01 М (NH ₄) ₄ W ₅ O ₁₇ ·2,5H ₂ O	-1,690	62,5	-22,5
1М NaOH + 0,1 М Na ₂ SiO ₃	-1,935	312,5	-125
1М NaOH + 0,1 М C ₁₄ H ₈ O ₈	-1,525	620	-425
1М NaOH + 0,01 М C ₁₄ H ₈ O ₈	-1,838	217,5	-210

Як неорганічні інгібітори, так і карбонові кислоти [6] призводили до більш суттєвого зростання

анодної поляризації в порівнянні з катодною. Як бачимо, $C_{14}H_8O_8$ та $(NH_4)_4W_5O_{17} \cdot 2,5H_2O$ зміщували стаціонарний потенціал Al до більш додатних значень (таблиця 1). Наявність 0,1 M Na_2SiO_3 майже не впливала на цей показник, а в присутності 0,01 M $SnSO_4$ $E_{ст.}$ зсунувся до більш негативних значень.

Характер кривих 2 та 2' рис. 1 вказує на те, що добавка $SnSO_4$ суттєво не змінює загальної швидкості корозії алюмінію. Зростання анодної поляризації незначне в порівнянні з іншими інгібіторами, до того ж зменшується катодна поляризація. Певний інгібуючий ефект станом сульфату можна пов'язати з контактним виділенням Sn з утворенням окремих острівців на поверхні алюмінію, що не перешкоджає його розчиненню, але разом з тим може змінювати перенапругу виділення водню [9]. $SnSO_4$ не є корисним в якості індивідуального інгібітора, але не виключено, що його наявність покращить вплив інших добавок, в особливості тих, що сильно пригальмовують анодний процес, зокрема, $C_{14}H_8O_8$ (таблиця 1).

Добавка Na_2SiO_3 помітно впливає на анодний процес і незначно збільшує катодну поляризацію (криві 3 та 3' рис. 1; таблиця 1). Відомо, що введення силікатів відображається на перебігу як анодної, так і катодної реакції, що пов'язано з утворенням на поверхні алюмінію пасиваційних шарів з важкорозчинних речовин [8]. У [10] відмічається, що більш високий ступінь захисту алюмінієвого сплаву АД-31 у слаболужному розчині триетаноламіну досягається саме при використанні натрій силікату у комбінації з ортофосфатною кислотою. Тому для зменшення швидкості корозії алюмінію слід випробувати Na_2SiO_3 у сполученні з $C_{14}H_8O_8$ та $SnSO_4$.

Особливо сильне зміщення стаціонарного потенціалу до -1,06 В спостерігалось у присутності в лужному середовищі 0,1M $(NH_4)_4W_5O_{17} \cdot 2,5H_2O$. Це може свідчити про хімічну природу зв'язку металу з інгібітором. Про те, що добавка $(NH_4)_4W_5O_{17} \cdot 2,5H_2O$ сильно зменшує загальну корозію алюмінію за рахунок окислення його активної поверхні, свідчать також дуже низькі анодні струми та висока поляризація анодного процесу (крива 5 рис. 1). Вольфрамат-іони також помітно впливають і на катодну поляризацію (крива 5' рис. 1). Таким чином, вольфрамат-іони подібно до хромат- та біхромат-іонів є інгібіторами змішаного типу. Ймовірно, що механізм дії вольфрамат-іонів обумовлений їх адсорбцією на поверхні металу. При цьому вольфрамат-іони є акцепторами електронів, а взаємодія з металом відбувається за рахунок атомів Оксигену [8]. Але не слід повністю виключати можливість утворення при наявності в 1M NaOH вольфрамат-іонів тонкої конверсійної плівки на поверхні алюмінію, яка пригальмовує його анодне розчинення. Подібні спостереження описані у роботі [12], в якій досліджувалось формування пасивуючих плівок у лужному середовищі в присутності вольфрамат- і титанат-іонів на поверхні цинку та його сплавів.

Оскільки значне гальмування анодного процесу є небажаним, то концентрацію добавки $(NH_4)_4W_5O_{17} \cdot 2,5H_2O$ було знижено до 0,01 моль/л. З характеру кривих 4 та 4' рис. 1 очевидно, що при малій концентрації вольфраму відбувається зростання швидкості розчинення алюмінію. Особливо знижується катодна поляризація (таблиця 1), тобто в присутності малих концентрацій вольфраму відбувається зростання ефективності катодного процесу. Подібні явища спостерігались і при інгібуванні корозії сталі натрій вольфрамом ($C = 0,001 - 0,2$ моль/л) у середовищах 0,1 н. Na_2SO_4 та 30 мг/л NaCl + 70 мг/л Na_2SO_4 [8].

Надалі при аналізі поляризаційних кривих (рисунок 2) були визначені потенціали та струми корозії як для самих ефективних індивідуальних інгібіторів, $(NH_4)_4W_5O_{17} \cdot 2,5H_2O$ та $C_{14}H_8O_8$, так і для багатокомпонентних добавок, що містили: 0,01 M $C_{14}H_8O_8$ + 0,01 M $SnSO_4$; 0,01 M $C_{14}H_8O_8$ + 0,01 M $SnSO_4$ + 0,1 M Na_2SiO_3 . Отримані значення $E_{кор.}$ та $j_{кор.}$ представлені у таблиці 2.

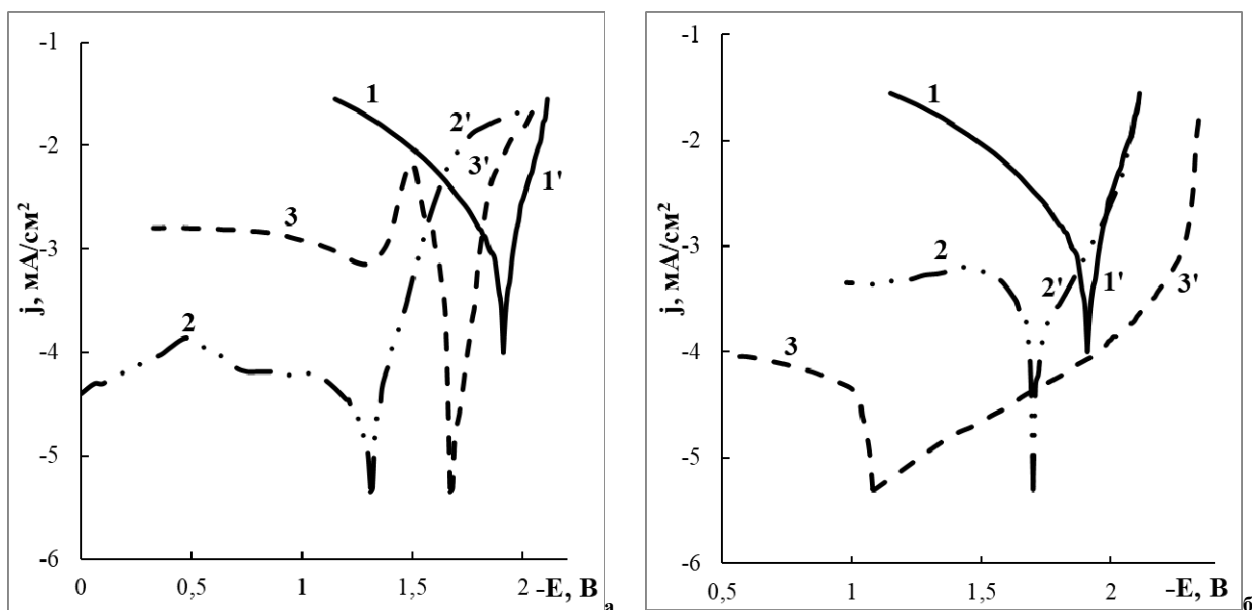


Рис. 2. Поляризаційні криві на електродах з алюмінію у 1 M розчині NaOH без (1, 1') і при наявності однокомпонентних інгібіторних добавок (а): 2, 2' – 0,1 M $(NH_4)_4W_5O_{17} \cdot 2,5H_2O$; 3, 3' – 0,1M $C_{14}H_8O_8$ та багатокомпонентних інгібіторних добавок (б): 2, 2' – 0,01M $C_{14}H_8O_8$ + 0,01M $SnSO_4$; 3, 3' – 0,01M $C_{14}H_8O_8$ + 0,01M $SnSO_4$ + 0,1M Na_2SiO_3

Як бачимо, всі досліджені індивідуальні та багатокомпонентні інгібіторні добавки забезпечують зсув $E_{кор.}$ у бік більш додатних значень та помітне зниження $j_{кор.}$ (таблиця 2). Поляризаційні криві показують, що при наявності інгібіторів зростає поляризація катодного процесу (криві 1' – 3' рис. 2а та 2б) та помітно знижуються значення анодних струмів (криві 2, 3 рис. 2а та 2б) у порівнянні з тими, що спостерігаються в 1М розчині NaOH (крива 1 рис. 2). До того ж введення добавок призводить до виходу анодного струму на граничне значення, що вказує на перебіг окиснення алюмінію зі стабільною у часі швидкістю.

Таблиця 2

Потенціали та струми корозії на електродах з алюмінію у досліджуваних розчинах

Розчин	$E_{кор.}$, В	$j_{кор.}$, mA/cm ²
1М NaOH	-1,98	3,162
1М NaOH + 0,1М (NH ₄) ₄ W ₅ O ₁₇ ·2,5H ₂ O	-1,32	0,038
1М NaOH + 0,1М C ₁₄ H ₈ O ₈	-1,78	0,240
1М NaOH + 0,01М C ₁₄ H ₈ O ₈ + 0,01М SnSO ₄	-1,88	0,316
1М NaOH + 0,01М C ₁₄ H ₈ O ₈ + 0,01М SnSO ₄ + 0,1М Na ₂ SiO ₃	-1,65	0,063

Дані таблиці 2 показують, що добавка тетраамоній пентавольфрамату суттєво зміщує потенціал корозії до більш додатних значень, а нафталінтетракарбонова кислота та багатокомпонентні інгібіторні добавки – у меншій мірі. Найбільш значне зниження струму корозії забезпечує багатокомпонентний інгібітор 0,01М C₁₄H₈O₈ + 0,01М SnSO₄ + 0,1М Na₂SiO₃ – у 50 разів та 0,1М (NH₄)₄W₅O₁₇·2,5H₂O – у 83 рази, при цьому остання добавка суттєво гальмує анодний процес розчинення алюмінію (крива 2 рис. 2а). Ці інгібітори можна рекомендувати для корозійного захисту алюмінію при його використанні у якості конструкційного матеріалу у слаболужних та лужних середовищах.

Менш значне гальмування анодного процесу при суттєвому зниженні струму корозії спостерігалось у присутності інгібіторних добавок 0,1М C₁₄H₈O₈ та 0,01М C₁₄H₈O₈ + 0,01М SnSO₄ (крива 3 рис. 2а та крива 2 рис. 2б; таблиця 2). При наявності у 1М NaOH 0,1М C₁₄H₈O₈ $j_{кор.}$ знизився у 13 разів, а композиції 0,01М C₁₄H₈O₈ + 0,01М SnSO₄ – у 10 раз. Зазначимо, що використання двокомпонентної інгібіторної композиції також дозволяє збільшити поляризацію катодного процесу, до того ж вона містить органічну речовину у десятикратно меншій концентрації. Таким чином для зниження швидкості самочинної корозії Al аноду в алюміній-повітряних елементах слід застосовувати інгібіторну добавку 0,01М C₁₄H₈O₈ + 0,01М SnSO₄.

Висновки

Встановлено, що серед досліджених неорганічних речовин ефективним індивідуальним інгібітором корозії алюмінію може слугувати тільки тетраамоній пентавольфрамат (NH₄)₄W₅O₁₇·2,5H₂O. В присутності цієї добавки у лужному середовищі потенціал корозії значно зміщується у позитивну сторону, а струм корозії знижується у 83 рази. SnSO₄ та Na₂SiO₃ не є корисними в якості індивідуальних інгібіторів, але їх наявність може покращити вплив інших добавок, зокрема нафталінтетракарбонової кислоти.

Визначено, що багатокомпонентний інгібітор 0,01М C₁₄H₈O₈ + 0,01М SnSO₄ + 0,1М Na₂SiO₃ знижує струм корозії у 50 разів, а двокомпонентна інгібіторна композиція 0,01М C₁₄H₈O₈ + 0,01М SnSO₄ – у 10 разів. Тому (NH₄)₄W₅O₁₇·2,5H₂O та багатокомпонентний інгібітор можуть бути рекомендовані для корозійного захисту алюмінію при його використанні у якості конструкційного матеріалу у слаболужних та лужних середовищах. Двокомпонентна інгібіторна композиція, крім зниження струму корозії і забезпечення постійної швидкості анодного розчинення алюмінію, ще й дозволяє збільшити катодну поляризацію. Тому вона може бути використана для зниження швидкості самочинної корозії Al аноду в алюміній-повітряних елементах.

Література

1. Сильман Г. И. Материаловедение / Г. И. Сильман. – М. : Издательский центр «Академия», 2008. – 336 с.
2. Штефан В. В. Коррозия алюминия за контакту з окисдованими титаном та цирконієм / В. В. Штефан, Б. І. Байрачний [та ін.] // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2015. – № 5. – С. 107–113.
3. Богоявленська О. В. Удосконалення технології мікродугового окисдування сплавів алюмінію у лужних середовищах : автореферат дис. на здобуття наук. ступеня к. т. н. 05.17.03 – технічна електрохімія / О. В. Богоявленська. – Харків, 2010. – 17 с.
4. Лукашук Т. С. Исследование влияния состава солевых электролитов на коррозионное и анодное поведение алюминия / Т. С. Лукашук, В. И. Ларин // Вісник Харківського національного університету. – 2008. – № 820. – Хімія, Вип. 16(39). – С. 328–331.
5. Mori R. Electrochemical properties of a rechargeable aluminium-air battery with a metal-organic framework as air cathode material / R. Mori // Royal Society of Chemistry Advances. – 2017. – № 7. – P. 6389 – 6395.
6. Заверач Є. М. Карбонові кислоти як інгібітори корозії алюмінію у лужних середовищах / Є. М. Заверач, О. І. Стремечкий, А. В. Свінтіцький // Вісник Хмельницького національного університету. – 2018. – Т. 259, № 2. – С. 46–51.

7. Shao H. B. The cooperative effect of calcium ions and tartrate ions on the corrosion inhibition of pure aluminum in an alkaline solution / H. B. Shao, J. M. Wang, Z. Zhang et al. // *Materials Chemistry and Physics*. – 2003. – V. 77, № 2. – P. 305–309.
8. Розенфельд И. Л. Ингибиторы коррозии / И. Л. Розенфельд. – М. : Химия, 1977. – 352 с.
9. Антропов Л. И. Ингибиторы коррозии металлов / Л. И. Антропов, Е. М. Макушин, В. Ф. Панасенко. – Киев : Техніка, 1981. – 183 с.
10. Самойленко С. О. Корозійна поведінка алюмінієвого сплаву АД-31 у розчинах триетаноламіну / С. О. Самойленко, В. Б. Байрачний [та ін.] // *Сучасні проблеми електрохімії : збірник наукових праць*. – Харків : НТУ «ХПІ», 2015. – С. 265–266.
11. Abd El Aal E.E. Factors affecting the corrosion behaviour of aluminium in acid solutions. II. Inorganic additives as corrosion inhibitors for Al in HCl solutions / E. E. Abd El Aal, S. Abd El Wanees et al. // *Corrosion Science*. – 2013. – V. 68. – P. 14–24.
12. Петренко Л. В. Анодні плівки на цинку і його сплавах, сформовані в лужних розчинах у присутності вольфрамат- і титанат-іонів / Л. В. Петренко, В. І. Коробов, К. О. Ребрик // *Вопросы химии и химической технологии*. – 2011. – № 4(2). – С. 123–125.

References

1. Sil'man G. I. *Materialovedenie* / G. I. Sil'man. – М. : Izdatel'skij centr «Akademija», 2008. – 336 s.
2. Shtefan V. V. Koroziiia aliuminiuu za kontaktu z oksydovanymy tytanom ta tsyrkoniem / V. V. Shtefan, B. I. Bairachnyi [ta in.] // *Fizyko-khimichna mekhanika materialiv*. – 2015. – № 5. – S. 107–113.
3. Bohoiavlenska O. V. Udokonalennia tekhnolohii mikroduhovoho oksyduvannia splaviv aliuminiuu u luzhnykh seredovyshchakh : avtoreferat dys. na zdobuttia nauk. stupenia k. t. n. 05.17.03 – tekhnichna elektrokhimiiia / O. V. Bohoiavlenska. – Kharkiv, 2010. – 17 s.
4. Lukashhuk T. S. Issledovanie vlijanija sostava solevykh jelektrolitov na korrozionnoe i anodnoe povedenie aljuminija / T. S. Lukashhuk, V. I. Larin // *Visnik Harkivs'kogo nacional'nogo universitetu*. – 2008. – № 820. – Himija, Vip. 16(39). – S. 328–331.
5. Mori R. Electrochemical properties of a rechargeable aluminium-air battery with a metal-organic framework as air cathode material / R. Mori // *Royal Society of Chemistry Advances*. – 2017. – № 7. – P. 6389 – 6395.
6. Zaverach Ye. M. Karbonovi kysloty yak inhibitory korozii aliuminiuu u luzhnykh seredovyshchakh / Ye. M. Zaverach, O. I. Stremetskyi, A. V. Svintitskyi // *Herald of Khmelnytskyi National University*. – 2018. – T. 259, № 2. – S. 46–51.
7. Shao H. B. The cooperative effect of calcium ions and tartrate ions on the corrosion inhibition of pure aluminum in an alkaline solution / H. B. Shao, J. M. Wang, Z. Zhang et al. // *Materials Chemistry and Physics*. – 2003. – V. 77, № 2. – P. 305–309.
8. Rozenfel'd I. L. Ingibitory korrozii / I. L. Rozenfel'd. – М. : Himija, 1977. – 352 s.
9. Antropov L. I. Ingibitory korrozii metallov / L. I. Antropov, E. M. Makushin, V. F. Panasenko. – Киев : Tehnika, 1981. – 183 s.
10. Samoilenko S. O. Koroziiina povedinka aliuminiievoho splavu AD-31 u rozchynakh tryetanolaminu / S. O. Samoilenko, V. B. Bairachnyi [ta in.] // *Suchasni problemy elektrokhimii : zbirnyk naukovykh prats*. – Kharkiv : NTU «KhPI», 2015. – S. 265–266.
11. Abd El Aal E.E. Factors affecting the corrosion behaviour of aluminium in acid solutions. II. Inorganic additives as corrosion inhibitors for Al in HCl solutions / E. E. Abd El Aal, S. Abd El Wanees et al. // *Corrosion Science*. – 2013. – V. 68. – P. 14–24.
12. Petrenko L. V. Anodni plivky na tsynku i yoho splavakh, sformovani v luzhnykh rozchynakh u prysutnosti volframmat- i tytanat-ioniv / L. V. Petrenko, V. I. Korobov, K. O. Rebryk // *Voprosy khymyy y khymycheskoj tekhnolohyy*. – 2011. – № 4(2). – S. 123–125.

Рецензія/Peer review : 6.2.2019 р. Надрукована/Printed :10.4.2019 р.

Рецензент: к. х. н., доц. Байдич Л. Е.

А. Л. БАШИНСЬКИЙ, С. А. ОСТАШЕВСЬКИЙ

Національна академія Державної прикордонної служби України

С. Л. БУКОЄМСЬКИЙ

Адміністрація Державної прикордонної служби України

ОЦІНКА СТАНУ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОЇ ПІДТРИМКИ ПАРКУ АВТОБРОНЕТАНКОВОЇ ТЕХНІКИ

У дослідженні авторами оцінено стан функціонування системи технічної підтримки парків органів Державної прикордонної служби. Встановлено причини існування прихованого конфлікту у системі. Запропоновано метод вирішення конфлікту та визначено напрямок подальшого дослідження за темою.

Ключові слова: система технічної підтримки, системний аналіз, конфлікт, адаптивна система, парк техніки, технічне обслуговування і ремонт.

A. L. BASHYNSKYI, S. A. OSTASHEVSKYI

National Academy of the State Border Guard Service of Ukraine

S. L. BUKOIEMSKYI

Administration of the State Border Guard Service of Ukraine

ESTIMATION OF FUNCTIONING STATE OF TECHNICAL SUPPORT SYSTEM OF ARMoured VEHICLES FLEET

In the article the current functioning state of technical support system of armoured vehicles fleets was estimated. The building of current reality tree using the methods described in the theory of constraints by E. Goldratt which enables to distinguish the system elements resulting in the existence of hidden conflict. The results of conducted analysis contributed to formulation of main methods of achievement of ultimate goal of functioning system and enumeration of conditions when each method can ensure maximum efficiency. The essence of the first method means that the whole vehicles fleet is maintained in the place of station of the unit of the State Border Guard Service of Ukraine. The second method means that all the vehicles are maintained in place of station of appropriate units; and the third – all the vehicles are maintained at the repair enterprises or service network points defined by a manufacturer or supplier by place of location of border guard units and organs. It has determined that in case of combined use of methods there are difficulties which are connected particularly with system autonomy, its resistance to interior and exterior factors, continuity, high quality and timeliness of technical maintenance services to vehicles fleet. The main reasons of existence of conflict within the system is a wide geography of places of permanent station of certain units within the border guard organ, wide range of vehicles, joint use of new models and vehicles with long-term exploitation. It confirms the necessity to design fundamentally new combined and adaptive system of technical support of vehicles fleet. The authors determined the further direction of research. It is to find the optimal combination of system elements and search index, which demonstrate the best of varinativ by a combination of a number of properties of the system.

Key words: technical maintenance support, system analysis, conflict, adaptive system, vehicles fleet, technical maintenance and repair.

Постановка проблеми у загальному вигляді

Попередні дослідження процесу функціонування системи технічної підтримки парків техніки органів Державної прикордонної служби України показали наявність конфлікту між існуючою планово-попереджувальною системою технічного обслуговування і ремонту та окремими елементами індивідуальної системи технічного обслуговування і ремонту, без впровадження яких неможливо забезпечити виконання основних вимог Стратегії розвитку Державної прикордонної служби [1]. Крім того, специфіка функціонування Державної прикордонної служби як правоохоронного органу спеціального призначення [2] вимагає підтримання існуючого парку техніки у постійній готовності до застосування за призначенням [3]. Забезпечення високого рівня готовності парку техніки, за умов постійного оновлення його марочного складу, є складним процесом, який вимагає не лише поєднання окремих елементів різних систем технічного обслуговування і ремонту, а також здійснення інформаційного забезпечення системи технічної підтримки парків техніки. Оскільки стратегія розвитку Державної прикордонної служби і основні напрямки діяльності та подальшого розвитку Державної прикордонної служби у 2018 році [1] передбачають активізацію переоснащення органів ДПСУ новітніми зразками техніки та обладнанням з подальшим доведенням рівня забезпечення транспортними засобами, спеціальною та інженерною технікою до 100% штатної належності, при чому прогнозований відсоток машин з терміном експлуатації до п'яти років складатиме понад 30% від загальної кількості транспортних засобів, що перебувають на озброєнні, то простого поєднання окремих елементів різних систем недостатньо. За вказаних умов розвитку парку техніки необхідною умовою забезпечення його постійної готовності до застосування за призначенням є побудова комбінованої адаптивної системи технічної підтримки парків техніки у межах кожного з органів Державної прикордонної служби, яка адекватно реагуватиме не тільки на зміну вікового та марочного складу парку, а також дозволить максимально ефективно інтегрувати у систему місцеву ремонтно-відновлювальну базу.

Аналіз останніх досліджень чи публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми

Методи удосконалення системи експлуатації техніки досліджували такі вчені: С. А. Абрамов, С. А. Волков, В. А. Зорін, А. П. Ковальов, А. К. Рейш та інші. У їх роботах показано зв'язок ефективності з питаннями надійності, раціонального підбору техніки, обслуговування і ремонту. Разом з тим, наукові

результати та рекомендації зазначених робіт стосуються цивільних автотранспортних підприємств і не враховують специфіку експлуатації техніки в умовах органів Державної прикордонної служби України.

Формулювання цілей статті (постановка завдання)

Метою даного дослідження є аналіз та оцінка реального процесу функціонування системи технічної підтримки парку техніки Державної прикордонної служби України, пошук основних причин виникнення конфлікту між окремими елементами системи, пошук методів усунення конфлікту та визначення подальших можливих способів їх реалізації.

Виклад основного матеріалу дослідження

У дослідженні застосовується ряд вихідних понять у наступній редакції:

- технічна підтримка парку автомобільної та бронетанкової техніки – комплекс своєчасних та якісних організаційно-технічних впливів на машини парку із відповідним інформаційним забезпеченням;
- інформаційне забезпечення технічної підтримки – процес інформаційного супроводу визначення потреб парку у технічних впливах з одного боку та можливостей їх задоволення органами технічної підтримки з іншого;
- органи технічної підтримки – групи по ремонту транспортних засобів та спеціальної техніки органу Державної прикордонної служби України, відділення забезпечення підрозділів охорони кордону, підприємства та станції технічної підтримки та ін.

Таким чином технічна підтримка парку техніки здійснюється у межах відповідної системи, основою якої є підсистеми технічного обслуговування і ремонту, органів технічної підтримки та інформаційної підтримки прийняття рішень стосовно здійснення організаційно-технічних впливів на машини парку. Оцінку фактичного стану функціонування системи технічної підтримки парку техніки Державної прикордонної служби України у цілому здійснено із застосуванням методу побудови дерева поточної реальності (Current Reality Tree), запропонованого Е. Голдратом [4]. Дана логічна побудова надала можливість наглядно продемонструвати поточний стан функціонування системи та побудувати відповідні причинно-наслідкові зв'язки між видимими проявами станів системи та виявити причини їх виникнення. Крім того, метод дозволив сформулювати кінцеву мету функціонування системи (задачу, для розв'язання якої вона побудована), побудувати систему вихідних положень, складових елементів системи, визначити границі зон контролю та впливу керівного апарату, описати кореляційні та причинно-наслідкові зв'язки між окремими станами системи, виявити небажані прояви у системі та перевірити реальність їх існування, сформулювати масив істинних причин існування небажаних проявів та виокремити ключову проблему, перевірити логіку побудови за чітко сформульованими критеріями. Результатом застосування методу оцінки фактичного стану функціонування системи технічної підтримки парку техніки Державної прикордонної служби України є діаграма існуючих станів функціонування системи та наявності відповідних причинно-наслідкових зав'язків між ними, яка наведена на рис. 1.

У ході побудови діаграми (на рис. 1) виявлено ряд істинних причин, які не дозволяють у повному обсязі досягти кінцевої мети функціонування системи технічної підтримки парку техніки Державної прикордонної служби України, яка, крім того, закріплена відповідним наказом Міністерства внутрішніх справ України [3], та полягає у забезпеченні постійної готовності парку техніки до застосування за призначенням. До них відносяться:

- активне оновлення парку техніки із сумісною експлуатацією зразків вітчизняного, зарубіжного, пострадянського та радянського виробництва, які мають тривалий термін експлуатації;
- недовість системи інформаційної підтримки, яка полягає у неможливості, на даний час, забезпечити її своєчасність, якість та безперервність;
- обмежене фінансове забезпечення, яке не дозволяє у повному обсязі забезпечити здійснення усього необхідного комплексу організаційно-технічних впливів на машини парку техніки.

Так, активне оновлення парку техніки Державної прикордонної служби призводить до того, що на озброєння надходять сучасні складні у обслуговуванні зразки транспортних засобів, які перебувають на гарантійному чи постгарантійному обслуговуванні. Порядок здійснення технічного обслуговування в період гарантійного терміну експлуатації чітко регламентований наказами міністерствами промислової політики та транспорту України [5–7] і передбачає ведення сервісної книжки для кожного із зразків, у якій чітко визначається перелік пунктів сервісної мережі, які мають право проводити роботи з технічного обслуговування і ремонту цих зразків. При чому споживач, у даному випадку підрозділ, який експлуатує машину, зобов'язаний у терміні, зазначені у сервісній книжці звернутися до одного із пунктів визначеної сервісної мережі для виконання чергового технічного обслуговування, у разі порушення термінів виконання технічного обслуговування втрачається право на виконання виробником гарантійних зобов'язань. До втрати цього права також призводить порушення пломб, встановлених виробником. Роботи з технічного обслуговування протягом гарантійного терміну експлуатації проводяться за плату, окрім робіт з усунення виявлених недоліків транспортного засобу. Проведення гарантійного ремонту також передбачає доставку транспортного засобу на один із пунктів сервісної мережі та відрив зразка на термін до 14 днів. Крім того, у наказі [6] чітко визначено, що надання послуг з технічного обслуговування і ремонту автомобільних транспортних засобів здійснюються лише на договірній основі та передбачає проведення комплексу робіт у відповідності до вимог експлуатаційної, ремонтної, технологічної документації, нормативними документами та інших умов договору. За відсутності експлуатаційної документації виконання робіт здійснюється у

відповідності із наказом [7]. Таким чином, у разі здійснення технічного обслуговування і ремонту на одному із пунктів сервісної мережі, у будь-якому випадку відбувається тимчасовий відрив транспортного засобу, який передбачає час на безпосереднє виконання робіт та його транспортування до місця проведення робіт, крім того роботи супроводжуються відповідною інформаційною підтримкою, яка полягає у визначенні можливостей пунктів сервісної мережі та прийняття рішення про виконання робіт у конкретному пункті, виготовлення та супроводження договірної документації, витребування та витрату коштів у порядку передбаченому керівними документами міністерств внутрішніх справ та фінансів України.

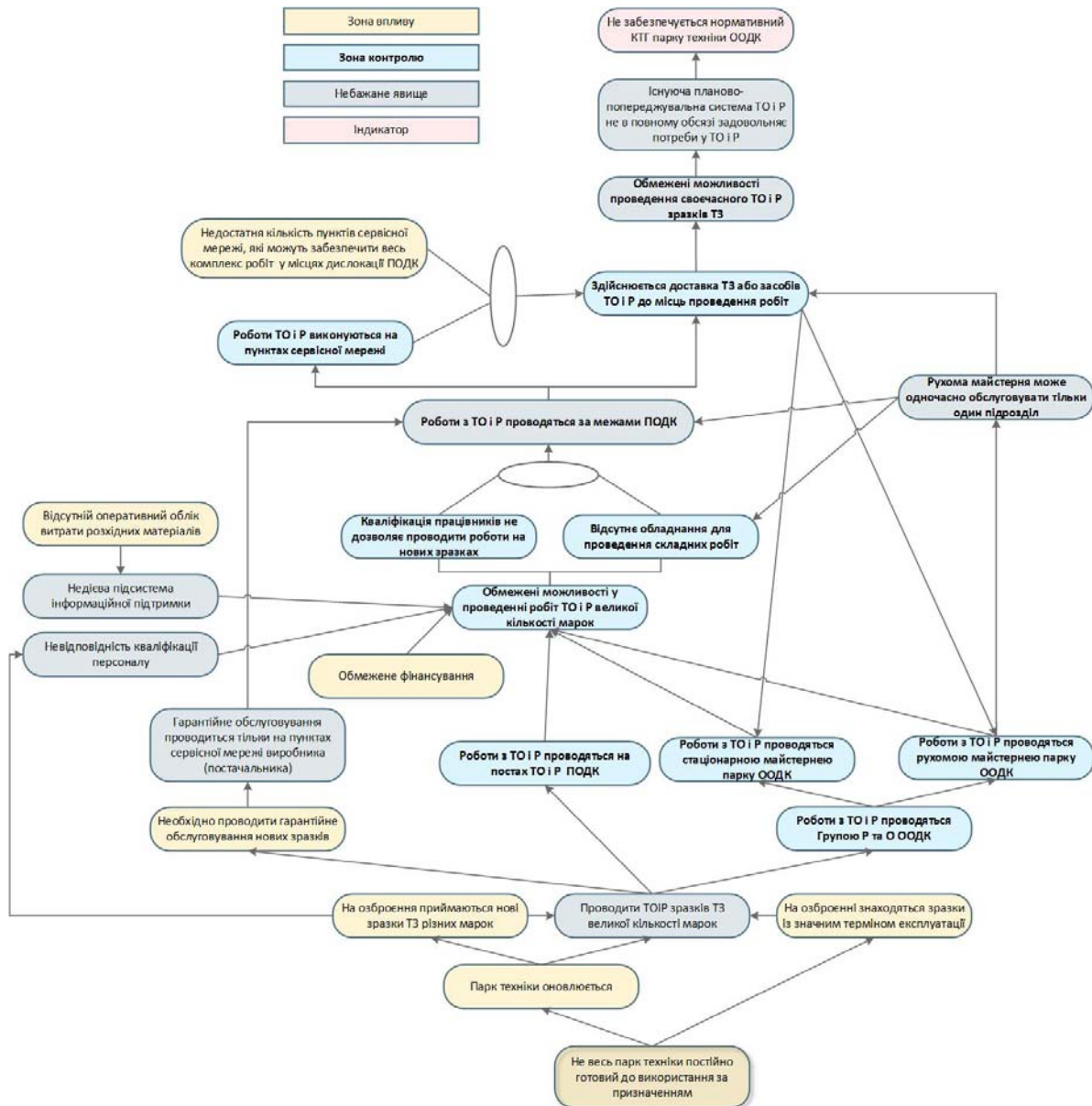


Рис. 1. Дерево поточної реальності функціонування системи технічної підтримки парку техніки Державної прикордонної служби України: ТО і Р – технічне обслуговування і ремонт; ТЗ – транспортний засіб; ПОДК – підрозділ охорони кордону; ООДК – орган охорони кордону; КТГ – коефіцієнт технічної допомоги

Існуюча у Державній прикордонній службі України планово-попереджувальна система технічного обслуговування і ремонту [3] передбачає здійснення робіт з технічного обслуговування і ремонту у парках органів та постах технічного обслуговування і ремонту у підрозділах охорони кордону, які дислоковані окремо. Існуючі норми забезпечення парковим устаткуванням [8] передбачають комплектування лише парків органів Державної прикордонної служби та визначають прикріплення підрозділів, які не мають штатних спеціалістів та умов для проведення технічного обслуговування і поточного ремонту, до відповідних органів. Нормами № 2 та № 3 передбачено комплектування парків спеціалізованим обладнанням, до якого входить устаткування для мийно-прибиральних, промивальних та очисних робіт, підйнятно-транспортне устаткування, устаткування для змачування машин, заправлення їх мастилами, повітрям та робочими рідинами, для діагностики, контролю і регулювання, вузлів та систем, електроустаткування, розбірно-складальне та ремонтне устаткування, слюсарно-монтажний інструмент, шиноремонтне та шиномонтажне устаткування; металорізальними та деревообробними верстатами,

допоміжним устаткуванням та майном, спеціальним парковим устаткуванням для консервації машин, нестандартизованим парковим устаткуванням.

Технічне обслуговування машин на постах технічного обслуговування і ремонту у підрозділах здійснюється за рахунок використання індивідуальних комплектів запасних частин, інструменту та приладдя, яким комплектується кожен із зразків згідно з таблицею [8]. Він передбачає наявність індивідуального комплекту запасних частин, інструменту та приладдя для технічного обслуговування машин водієм, заправного інвентарю під додаткове пальне і мастило, шанцевого інструменту, засобів буксирування та підвищення прохідності, світломаскувального та світлотехнічного обладнання, засобів забезпечення безпеки руху, укриттів брезентів та засобів утеплення двигунів.

Таким чином передбачається можливість проведення робіт з технічного обслуговування та поточного ремонту у підрозділах охорони кордону та ремонтних підрозділах органів Державної прикордонної служби, проведення середніх ремонтів – тільки у ремонтних підрозділах органів Державної прикордонної служби, капітальних ремонтів – тільки на спеціалізованих ремонтних підприємствах. Відповідно відрив транспортних засобів у такому випадку передбачає транспортування зразків лише у випадку необхідності проведення поточних ремонтів підвищеної складності та капітальних ремонтів. Проведення робіт сезонного технічного обслуговування, поточних ремонтів із заміною вузлів чи агрегатів і середніх ремонтів передбачає можливість застосування рухомої майстерні з технічного обслуговування і ремонту на базі одного із підрозділів охорони кордону, який може забезпечити необхідні умови з проведення робіт.

Отже, подібний розподіл сил та засобів також призводить до необхідності транспортування зразків до органу чи сусіднього підрозділу охорони кордону або переміщення рухомої майстерні до місць проведення робіт. У такому випадку інформаційне забезпечення технічної підтримки парку автомобільної та бронетанкової техніки повинно здійснюватися у відповідності до оперативної зміни стану укомплектованості підрозділів охорони кордону індивідуальними комплектами запасних частин і приладдя, можливостей рухомої ремонтної майстерні та потоку заявок на здійснення поточних та середніх ремонтів стаціонарної майстерні парку органу Державної прикордонної служби. У даному випадку оперативність оновлення облікових даних визначатиме ефективність здійснення інформаційної підтримки.

Таким чином підрозділам, які експлуатують вказані зразки, необхідно здійснювати обслуговування зразків, які мають тривалий термін експлуатації, власними силами та утримувати відповідне парко-гаражне обладнання поряд із зразками, обслуговування яких необхідно здійснювати тільки у пунктах сервісної мережі заводу виробника чи постачальника техніки. Такий стан справ призводить до того, що існує необхідність здійснювати різні технічні впливи залежно від типу, марки та віку транспортних засобів. При чому, оцінка технічного стану нових зразків техніки можлива лише за наявності спеціального діагностичного обладнання та фахівців, які мають відповідну кваліфікацію. Відповідно підрозділи, які здійснюють технічну підтримку парків окремих органів Державної прикордонної служби, мають обмежені можливості у забезпеченні постійної готовності зразків до використання за призначенням. Даний негативний прояв, крім того пов'язаний із необхідністю здійснення закупівель послуг з технічного обслуговування та ремонту у підприємствах, які не входять у структуру Державної прикордонної служби України, що з одного боку вимагає стабільного фінансового забезпечення та призводить до зниження рівня автономності системи технічного забезпечення діяльності Державної прикордонної служби України у цілому з іншого. Крім того, різке зростання загальної кількості марок та типів техніки у межах одного органу Державної прикордонної служби призводить до необхідності дообладнання існуючих рухомих майстерень, які входять до складу груп з ремонту та технічного обслуговування органу, додатковим діагностичним обладнанням, яке дозволить оцінити дійсний технічний стан зразка, який обслуговується. При чому наявність такого обладнання не дозволяє гарантувати можливість відновлення готовності парку техніки до застосування за призначенням. Такий стан справ призводить до дестабілізації функціонування системи технічної підтримки парків автобронетанкової техніки та порушення стійкості системи до впливу на неї описаних факторів, що свідчить про порушення автономності функціонування системи та високої її залежності від зовнішніх факторів.

Аналіз дерева поточної реальності (рис. 1) показав існування прихованого конфлікту у системі технічної підтримки парків автобронетанкової техніки. Суть конфлікту наведена на рис. 2.

Причин існування прихованого конфлікту декілька. Основою вказаних причин є ряд вихідних припущень існування умов реалізації максимальної ефективності реалізації кожного із методів досягнення кінцевої мети функціонування системи (рис. 2). Суть першої умови полягає у наступному: для того, щоб усі транспортні засоби, які перебувають на озброєнні перебували у постійній готовності до використання за призначенням необхідно забезпечити якість та своєчасність технічної підтримки усіх машин силами групи технічного обслуговування і ремонту органу Державної прикордонної служби. Вихідними припущеннями оптимального функціонування цієї умови є:

- обладнання стаціонарної майстерні дозволяє задовільнити усі потреби у проведенні робіт з технічного обслуговування і ремонту для усіх типів машин, які перебувають на озброєнні органу;
- штат стаціонарної майстерні передбачає достатню кількість вузьких спеціалістів, які забезпечують можливість проведення усього комплексу робіт з відновлення готовності машин до використання за призначенням;

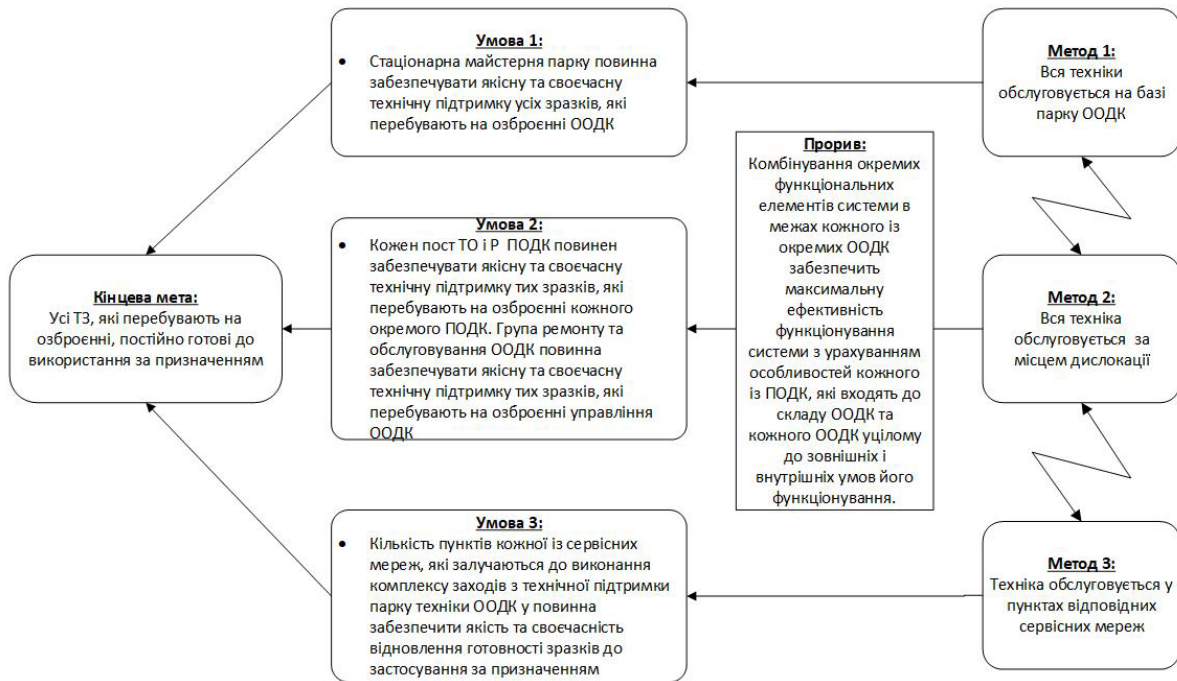


Рис. 2. Діаграма вирішення конфлікту

- проведення комплексу робіт не передбачає процедури закупівлі відповідних послуг у сторонніх осіб чи організацій;
- проведення робіт на базі стаціонарної майстерні дозволяє оперативно реагувати на потребу у витратних засобах;
- проведення робіт на базі стаціонарної майстерні дозволяє виконувати роботи за собівартістю;
- проведення робіт на базі стаціонарної майстерні дозволяє мінімізувати загальну кількість обладнання і спеціалістів, необхідних для організації та виконання робіт;
- уся несправна техніка концентрується в одному місці;
- забезпечується мінімальний штат спеціалістів відділень забезпечення підрозділів охорони кордону;
- забезпечується мінімізація парко-гаражного обладнання, яке необхідне для підтримання техніки у готовності до використання у підрозділах охорони кордону;
- виконання усього спектру робіт на базі парку органу не потребує утримання однотипного обладнання у інших підрозділах;
- відсутня потреба у доставці витратних матеріалів до окремо дислокованих підрозділів;
- рухома майстерня дозволяє виконувати раптово виникаючі роботи з технічного обслуговування і ремонту у місцях виходу транспортних засобів з ладу.

Друга умова досягнення кінцевої мети функціонування системи (рис. 2) полягає у тому, що для того, щоб усі транспортні засоби, які перебувають на озброєнні перебували у постійній готовності до використання за призначенням необхідно забезпечити можливість їхнього обслуговування у місцях дислокації відповідних підрозділів. Система вихідних припущень функціонування цієї умови складається із наступних тверджень:

- 1) відсутня витрата часу на доставку машин підрозділів охорони кордону до парку органу охорони кордону;
- 2) загальна кількість марок транспортних засобів, які перебувають на озброєнні підрозділів значно менша від загальної кількості марок транспортних засобів парку техніки відповідного органу;
- 3) організація робіт на техніці підрозділу охорони кордону силами одного відділення забезпечення потребує меншу кількість спеціалістів;
- 4) для організації робіт на техніці підрозділу силами одного відділення забезпечення необхідна менша номенклатура спеціального обладнання у порівнянні із відповідною номенклатурою органу;
- 5) зі зменшенням кількості марок машин, які обслуговуються одним відділенням забезпечення підрозділу охорони кордону, зростає можливість застосування універсальних спеціалістів;
- 6) за меншої загальної кількості зразків, у порівнянні із загальним парком техніки органу, зростає якість виконання робіт з відновлення готовності техніки до використання за призначенням.
- 7) забезпечення технічної підтримки парку автомобільної та бронетанкової техніки не передбачає процедури закупівлі відповідних послуг у сторонніх осіб або організацій.
- 8) зменшується загальний час простою техніки, пов'язаний із відсутністю простою машин у черзі на виконання робіт.
- 9) відсутня необхідність у утримуванні рухомої майстерні;

10) забезпечується зменшення розсосередження транспортних засобів, які потребують технічних впливів у межах ділянки відповідальності органу, що дозволяє здійснювати ефективну евакуацію машин, які раптово вийшли з ладу, за допомогою евакуювача або однотипного зразка.

Третя умова: для того, щоб усі транспортні засоби, які перебувають на озброєнні перебували у постійній готовності до використання за призначенням, необхідно забезпечити можливість обслуговування у пунктах відповідних сервісних мереж тому, що:

- вивільняється штат працівників, які повинні проводити роботи з відновлення готовності машин до застосування за призначенням;
- відсутня потреба в утриманні коштовного обладнання для забезпечення технічної підтримки парку техніки органу державної прикордонної служби;
- роботи виконують сертифіковані фахівці, які забезпечать найвищу якість виконання робіт;
- відсутня потреба у накопиченні та розподілі витратних матеріалів;
- зменшується витрата часу на доставку зразків до місць проведення робіт;
- відсутня потреба у доставці засобів технічного обслуговування і ремонту до місць проведення робіт;
- зменшується обсяг фінансового забезпечення органу за рахунок оптимізації номенклатури посад;
- вирішується питання щодо організації здійснення гарантійного обслуговування нових машин;
- зменшується загальний час простою техніки, пов'язаний із відсутністю простою машин у черзі на виконання робіт, за умови достатньої пропускну здатності пунктів сервісної мережі;
- відсутня необхідність в утримуванні рухомої майстерні.

Таким чином, для того, щоб забезпечити якісну та своєчасну технічну підтримку парку техніки органу державної прикордонної служби силами групи ремонту і технічного обслуговування органу необхідно забезпечити можливість виконання усього спектру робіт на базі постійного парку органу тому, що:

- усі роботи з відновлення готовності машин до використання за призначенням проводяться у одному місці, що забезпечує надійний контроль за якістю та своєчасністю виконання робіт;
- виконання усього спектру робіт на базі парку органу передбачає забезпечення тільки стаціонарної та рухомої майстерень групи ремонту та обслуговування усім необхідним обладнанням та витратними матеріалами, що забезпечує мінімальну витрату активів органу;
- виконання усього спектру робіт на базі парку органу дозволяє мінімізувати потребу у вузькопрофільних спеціалістах;
- мінімальна потреба вузькопрофільних спеціалістів значно спрощує процес комплектування особовим складом групи ремонту та обслуговування органу;
- процес організації виконання робіт не передбачає проведення заходів, пов'язаних із закупівлею відповідних послуг у сторонніх осіб або організацій;
- наявність у штаті групи ремонту та обслуговування органу рухомої майстерні дозволяє забезпечити заходи з технічної підтримки зразків безпосередньо у місцях їх виходу із ладу;
- полегшується процес організації передачі зразків до підприємств, які здійснюють капітальний ремонт, оскільки уся несправна техніка концентрується у парку органу;
- забезпечується найвищий рівень автономності роботи системи технічної підтримки парків органів.

Для того, щоб забезпечити можливість кожним окремим постом технічного обслуговування і ремонту підрозділів охорони кордону здійснювати якісну та своєчасну технічну підтримку зразків, які перебувають на озброєнні кожного окремого підрозділу, а групою ремонту та обслуговування органу здійснювати технічну підтримку тих зразків, які перебувають на озброєнні управління органу необхідно організувати обслуговування усієї техніки у місцях дислокації відповідних підрозділів тому, що забезпечується оптимізація ділянок відповідальності кожного із ремонтних підрозділів, що дозволяє мінімізувати плече доставки машин до місць проведення робіт; забезпечується можливість здійснення уніфікації марочного складу зразків, які перебувають на озброєнні окремого підрозділу; уніфікація марочного складу кожного окремого підрозділу забезпечує мінімальну необхідність у відповідних спеціалістах та спеціальному обладнанні; проведення процедури закупівлі послуг з технічного обслуговування і ремонту необхідно проводити тільки для тих машин, які перебувають на гарантійному терміні експлуатації; виключається можливість простою техніки у черзі на проведення робіт; кожен керівник підрозділу охорони кордону володіє точною інформацією щодо термінів відновлення працездатності окремих машин; забезпечується достатній рівень автономності роботи системи технічної підтримки парків органів охорони кордону.

Для забезпечення максимальної ефективності функціонування третього методу досягнення кінцевої мети, а саме для того, щоб забезпечити відновлення готовності машин до застосування за призначенням у пунктах відповідних сервісних мереж, необхідно забезпечити їх достатню кількість тому, що парк техніки органу охорони кордону має широкую номенклатуру марок автомобільної та бронетанкової техніки; пункти сервісної мережі заводу виробника або постачальника спеціалізуються на виконанні робіт за чітко визначеним переліком марок та модифікацій зразків; організація виконання усього обсягу робіт на одній

станції технічного обслуговування вимагає забезпечення високої пропускної здатності такої станції та наявності відповідних сертифікатів, що відповідають номенклатурі марочного складу парку техніки органу; організація виконання усього обсягу робіт на одній станції технічного обслуговування викликає необхідність витрачання часу на доставку зразків до місця проведення робіт; відсутня потреба в функціонуванні відділень забезпечення у кожному підрозділі та групи ремонту і обслуговування у органі державної прикордонної служби у повному складі; процес організації виконання робіт зводиться до моніторингу можливостей пунктів сервісних мереж, які розташовані у межах відповідальності підрозділів органу державної прикордонної служби; організація робіт за договорами закупівлі послуг дозволяє суттєво обмежити необхідність накопичення та розподілу витратних одиниць в межах органу; за умови достатнього фінансового забезпечення виникає можливість організації переміщення машин до місць проведення робіт засобами пунктів сервісної мережі або компенсації здійснення відповідних перевезень; відсутня необхідність організації здійснення гарантійного обслуговування зразків; якість проведення робіт забезпечується гарантійними зобов'язаннями виконавця робіт перед замовником, підтвердженими відповідними документами; ефективність роботи системи технічної підтримки не залежить від ефективності роботи системи матеріально-технічного забезпечення; забезпечується стійкість роботи системи від впливу внутрішніх факторів.

Таким чином, у системі існує прихований конфлікт між трьома методами досягнення кінцевої мети функціонування системи технічної підтримки парків автомобільної та бронетанкової техніки органів державної прикордонної служби України суть цього конфлікту полягає у наступному: з одного боку, необхідно забезпечити функціонування системи технічної підтримки парків техніки органів державної прикордонної служби на базі груп ремонту та обслуговування, з другого – на базі відділень забезпечення відокремлених підрозділів охорони кордону та з третього – необхідність проведення робіт у пунктах сервісних мереж виробників та постачальників, але відсутні ресурси для того, щоб застосувати вказані методи одночасно тому, що значно ускладнюється процедура здійснення фінансового забезпечення органів державної прикордонної служби; процедура укладення договорів на послуги з відновлення готовності зразків до використання за призначенням вимагає проведення процедури забезпечення прозорості закупівель; процедура супроводження договорів вимагає забезпечення стабільності фінансового забезпечення; значно ускладнюється забезпечення оперативності обліку технічного стану зразків; порушується автономність роботи системи технічної підтримки парків техніки.

Існування прихованого конфлікту у системі технічної підтримки парків техніки свідчить про необхідність комбінування окремих функціональних елементів в межах кожного із окремих органів державної прикордонної служби, що забезпечить максимальну ефективність функціонування системи з урахуванням особливостей кожного із підрозділів, які входять до складу органу та кожного органу у цілому до зовнішніх і внутрішніх умов його функціонування.

Якщо вести усі варіанти комбінування елементів системи до однієї одиниці вимірювання, наприклад вартість (економічна складова), а з іншого боку оцінити технічну готовність, то існує можливість застосування деякого комплексного показника, наприклад «придатність-вартість», що забезпечить теоретичну можливість вибору оптимального варіанту комбінування елементів системи, що забезпечить максимальний рівень її адаптації до умов функціонування парку автомобільної та бронетанкової техніки. При цьому під придатністю варіанта розумітиметься рівень забезпечуваного коефіцієнту технічної готовності або коефіцієнту готовності парку техніки за мінімально можливою витратою активів органу.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямку

Отже, з метою оцінки дійсного стану функціонування системи технічної підтримки парків автобронетанкової техніки здійснено побудову дерева поточної реальності за допомогою методів описаних у Теорії обмежень за Е. Голдраттом, яка надала можливість виокремити елементи системи, які призводять до існування прихованого конфлікту у системі. Результати аналізу надали змогу сформулювати основні методи досягнення кінцевої мети функціонування системи та перелік умов, за яких кожен із методів забезпечить максимальний ефект. Суть першого методу полягає у тому, що весь парк техніки обслуговується у місці дислокації органу Державної прикордонної служби, другого – у тому, що вся техніка обслуговується у місцях дислокації відповідних підрозділів та третього – у тому, що уся техніка обслуговується на ремонтних підприємствах або пунктах сервісної мережі виробника або постачальника за місцями дислокації відповідних підрозділів та органів. У сумісному застосуванні кожного із методів існують труднощі, які пов'язані, насамперед, із забезпеченням автономності системи, її стійкості до дії ряду зовнішніх та внутрішніх факторів, безперервності, високої якості та своєчасності процесу надання послуг з технічної підтримки парку техніки. Головними причинами існування конфлікту у системі є широка географія розташування місць постійної дислокації окремих підрозділів у межах одного органу, широка номенклатура марок парку техніки та сумісне застосування як нових зразків, так і тих, які мають тривалий термін експлуатації. Це підтверджує необхідність побудови принципово нової комбінованої адаптивної системи технічної підтримки парку техніки.

Напрямок подальших розвідок є пошук оптимального варіанту комбінування окремих елементів системи, який забезпечить її максимальну адаптацію до зовнішніх та внутрішніх умов функціонування системи технічної підтримки парків та пошук складових комплексного показника ефективності функціонування такої системи.

Література

1. Стратегія розвитку Державної прикордонної служби : розпорядження Кабінету Міністрів України від 23 листопада 2015 року № 1189-р. – К. : АДПСУ, 2015. – 10 с.
2. Про Державну прикордонну службу України : закон України : офіц. текст станом на 03 квітня 2003 р. / Верховна Рада України. – К. : Парламентське вид-во, 2006. – 15 с.
3. Про затвердження Інструкції з автомобільного та бронетанкового забезпечення в Державній прикордонній службі України : наказ Міністерства внутрішніх справ України № 577 [Електронний ресурс] // Верховна рада України. – 2016. – Режим доступу : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/ru/z0886-18>.
4. Детмер У. Теория ограниченный Голдратта : Системный подход к непрерывному совершенствованию / Уильям Детмер ; перев. с англ. – 2-е издание. – М. : Альпина Бизнес Букс, 2008. – 444 с.
5. Про затвердження Порядку гарантійного ремонту (обслуговування) або гарантійної заміни дорожніх транспортних засобів : наказ Міністерства промислової політики № 721 [Електронний ресурс] // Верховна рада України. – 2004. – Режим доступу : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0072-05>.
6. Про затвердження Правил надання послуг з технічного обслуговування і ремонту автомобільних транспортних засобів : наказ Міністерства транспорту України № 792 [Електронний ресурс] // Верховна рада України. – 2002. – Режим доступу : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1609-14>.
7. Про затвердження Положення про технічне обслуговування і ремонт дорожніх транспортних засобів автомобільного транспорту : наказ Міністерства транспорту України № 102 [Електронний ресурс] // Верховна рада України. – 2002. – Режим доступу : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0268-98>.
8. Про затвердження Положення про укомплектування автомобільної та бронетанкової техніки індивідуальними комплектами запасних частин, інструменту і приладдя, основними агрегатами оборотного фонду, автомобільними шинами і акумуляторними батареями та забезпечення органів Державної прикордонної служби України парковим устаткуванням : наказ Міністерства внутрішніх справ України № 1092 [Електронний ресурс] // Верховна рада України. – 2016. – Режим доступу : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1462-16>.

References

1. Stratehiia rozvytku Derzhavnoi prykordonnoi sluzhby : rozporiadzhennia Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 23 lystopada 2015 roku № 1189-r. – K. : ADPSU, 2015. – 10 s.
2. Pro Derzhavnu prykordonnu sluzhbu Ukrainy : zakon Ukrainy : ofits. tekst stanom na 03 kvitnia 2003 r. / Verkhovna Rada Ukrainy. – K. : Parlamentske vyd-vo, 2006. – 15 s.
3. Pro zatverdzhennia Instruktсии z avtomobilnoho ta bronetankovoho zabezpechennia v Derzhavniy prykordonniy sluzhbi Ukrainy : nakaz Ministerstva vnutrishnikh sprav Ukrainy № 577 [Elektronnyi resurs] // Verkhovna rada Ukrainy. – 2016. – Rezhym dostupu : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/ru/z0886-18>.
4. Detmer U. Teorija ogranichenij Goldratта : Sistemnyj podhod k nepreryvnomu sovershenstvovaniju / Uil'jam Detmer ; perev. s angl. – 2-e izdanie. – M. : Al'pina Biznes Buks, 2008. – 444 s.
5. Pro zatverdzhennia Poriadku harantiinoho remontu (obsluhovuvannia) abo harantiinoi zaminy dorozhnikh transportnykh zasobiv : nakaz Ministerstva promyslovoi polityky № 721 [Elektronnyi resurs] // Verkhovna rada Ukrainy. – 2004. – Rezhym dostupu : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0072-05>.
6. Pro zatverdzhennia Pravyi nadannia posluh z tekhnichnoho obsluhovuvannia i remontu avtomobilnykh transportnykh zasobiv : nakaz Ministerstva transportu Ukrainy № 792 [Elektronnyi resurs] // Verkhovna rada Ukrainy. – 2002. – Rezhym dostupu : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1609-14>.
7. Pro zatverdzhennia Polozhennia pro tekhnichne obsluhovuvannia i remont dorozhnikh transportnykh zasobiv avtomobilnoho transportu : nakaz Ministerstva transportu Ukrainy № 102 [Elektronnyi resurs] // Verkhovna rada Ukrainy. – 2002. – Rezhym dostupu : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0268-98>.
8. Pro zatverdzhennia Polozhennia pro ukomplektuvannia avtomobilnoi ta bronetankovoi tekhniki indyvidualnymy komplektamy zapasnykh chastyn, instrumentu i pryladdia, osnovnymy ahrehatamy oborotnoho fondu, avtomobilnymy shynamy i akumuliatornymy batareiamy ta zabezpechennia orhaniv Derzhavnoi prykordonnoi sluzhby Ukrainy parkovym ustatkuvanniam : nakaz Ministerstva vnutrishnikh sprav Ukrainy № 1092 [Elektronnyi resurs] // Verkhovna rada Ukrainy. – 2016. – Rezhym dostupu : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1462-16>.

Рецензія/Peer review : 6.2.2019 р. Надрукована/Printed : 10.4.2019 р.
Рецензент: д. т. н., проф. Сівак В. А.

В. В. ГОРІН

Одеська державна академія технічного регулювання та якості

В. В. СЕРЕДА

Національний університет водного господарства та природокористування

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛООБМІНУ ПІД ЧАС КОНДЕНСАЦІЇ ХОЛОДОАГЕНТІВ У СЕРЕДИНІ МІНІКАНАЛІВ

У роботі наведено порівняння експериментальних даних різних авторів під час конденсації холодоагентів у середині мініканалів із різною внутрішньою геометрією. Порівняльний аналіз показав, що існує суттєва розбіжність у отриманих експериментальних значеннях коефіцієнтів тепловіддачі різних авторів під час конденсації різних холодоагентів у разі однакових режимних параметрів і геометричних розмірах мініканалів. Наведені результати розрахунків тепловіддачі під час конденсації різних холодоагентів у мініканалах за напівемпіричною залежністю, яка отримана для звичайних труб і заснована на теоретичній моделі турбулентної конденсації. Виявлено, що запропонована комплексна модель покращує опис експериментальних даних багатьох авторів у разі конденсації різних холодоагентів у середині мініканалів за умови, якщо число Re_l знаходиться у межах $Re_l = 2 \cdot 10^2 - 10^4$.

Ключові слова: конденсація в середині мініканалів, коефіцієнт тепловіддачі, холодоагент.

V. V. GORIN

Odessa State Academy of Technical Regulation and Quality

V. V. SEREDA

National University of Water and Environmental Engineering

INVESTIGATION OF HEAT TRANSFER COEFFICIENTS IN CONDENSING OF DIFFERENT FLUIDS INSIDE MINICHANNELS

Condensation inside minichannels occurs in evaporative systems of thermal desalinating plants, air conditioning systems, safety systems of reactors, heaters of power plants and condensers of cooling equipment. It is very important to have an exact knowledge of condensation heat transfer coefficients when their value is close to heat transfer from the side of cooling. Theoretical and experimental investigations of heat transfer coefficients in condensing of different fluids inside minichannels shown that accuracy of this prediction depends on the accuracy of volumetric vapour content and pressure drop at the interphase. The necessity of new studies concerning both local heat transfer coefficients and film condensation along perimeter and length of minichannels under annular, stratified and intermediate regimes of phase flow was substantiated. These characteristics being defined will allow determining more precisely the boundaries of the flow regimes and the methods of heat transfer prediction. In this paper the experimental data of different authors on condensation inside minichannels with different internal geometry (circular, semicircular, square and triangular) have been compared. Experimental investigations on condensation of freons R134a, R410A, R32, R22, R407C, R152a and propane R290 were carried out with the following parameters: hydraulic diameter $d_h = 1.1-1.3$ mm, mass velocity $G = 180-500$ kg/(m²s), liquid Reynolds numbers $Re_l = 2 \cdot 10^2 - 10^4$. It is obtained that there is a significant difference in the values of experimental heat transfer coefficients in the case of condensation with the same regime parameters and with the equal geometric parameters of the minichannels. The obtained results allowed suggest to use simple semiempirical dependence for heat transfer prediction in condensing inside minichannels. This dependence based on the theoretical model of turbulent condensation and were obtained for the case of condensation inside plane tubes. This model generalizes with sufficient accuracy (error $\pm 30\%$) all the experimental data on condensation inside minichannels. It should be taken into account one restriction while using the suggested relationship: Re_l must be within $2 \cdot 10^2 - 10^4$. Using this model for designing heat exchangers, which utilize such types of fluids will increase the efficiency of energy systems.

Keywords: condensation, fluid, heat transfer, minichannels.

Вступ

Застосування мініканалів і трубок є одним із способів інтенсифікації теплообміну у разі фазових перетворень та робить застосування мініканалів перспективним напрямом у створенні сучасних мініканальних конденсаторів холодильних агрегатів та автомобільних систем кондиціонування повітря. Використання мініканальних систем призводить до забезпечення високого рівня міцності апаратів, підвищення інтенсивності теплообміну та дозволяє зменшити кількість холодоагенту в них. У роботі [1] наведено результати наявних експериментальних досліджень теплообміну під час конденсації різних холодоагентів у середині мініканалів, а також наведено існуючі залежності щодо розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі у залежності від масового паровмісту за різними масовими швидкостями й тепловими потоками, показано вплив на тепловіддачу внутрішніх геометричних форм та розмірів мініканалів.

У запропонованій статті приведено порівняльний критичний аналіз результатів експериментальних досліджень різних авторів у разі конденсації різних холодоагентів у середині мініканалів за майже однаковими масовими швидкостями й геометричними розмірами у круглих та квадратних мініканалах, а також результати розрахунків тепловіддачі у мініканалах за напівемпіричною залежністю з роботи [2], яка отримана для звичайних труб і заснована на теоретичній моделі турбулентної конденсації.

Порівняльний аналіз результатів досліджень теплообміну у разі конденсації холодоагентів у середині мініканалів

На рис. 1–4 у графічному вигляді приведено порівняльний аналіз результатів експериментальних досліджень у разі конденсації холодоагентів R134a, R410A, R32 і R290 (пропане) у середині мініканалів із робіт [3–17] за майже однаковими масовими швидкостями й геометричними розмірами у круглих і квадратних мініканалах.

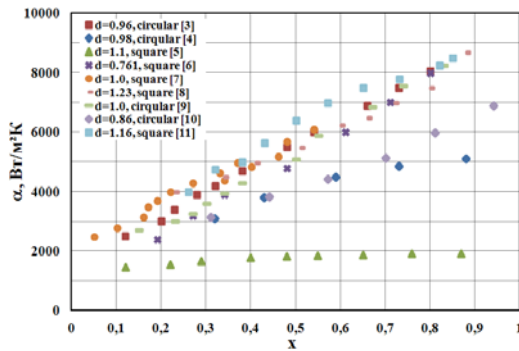


Рис. 1. Порівняння результатів досліджень у разі конденсації R134a у середині круглих і квадратних мініканалів із робіт [3 – 11] за $G = 350 - 450 \text{ кг/(м}^2\text{с)}$

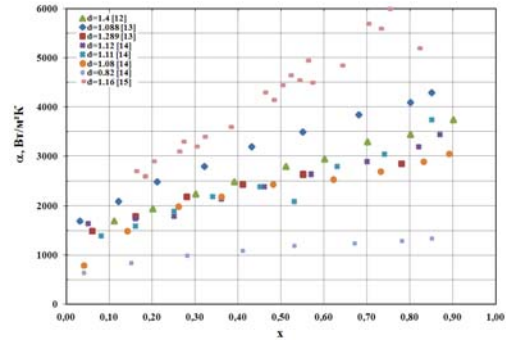


Рис. 1. Порівняння результатів досліджень у разі конденсації R410A у середині круглих мініканалів із робіт [12 – 15] за $G = 400 - 500 \text{ кг/(м}^2\text{с)}$

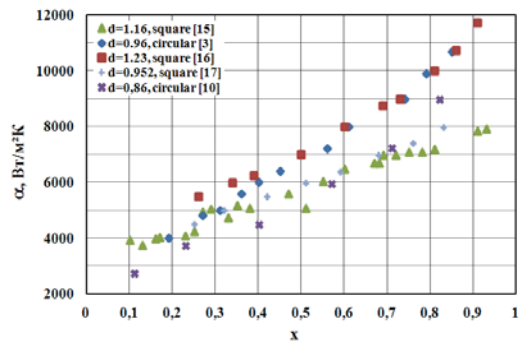


Рис. 3. Порівняння результатів досліджень у разі конденсації R32 у середині круглих і квадратних мініканалів із робіт [3, 10, 15 – 17] за $G = 390 - 475 \text{ кг/(м}^2\text{с)}$

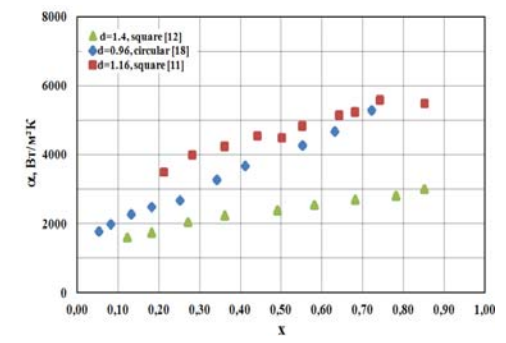


Рис. 4. Порівняння результатів досліджень у разі конденсації R290 (пропан) у середині круглих і квадратних мініканалів із робіт [8, 12, 15] за $G = 180 - 200 \text{ кг/(м}^2\text{с)}$

Порівняльний аналіз експериментальних досліджень різних авторів із рис. 1–4 свідчить про те, що існує суттєва розбіжність у значеннях експериментальних коефіцієнтів тепловіддачі для кожного з холодоагентів у разі практично однакових масових швидкостей і геометричних параметрах.

Така ж тенденція спостерігається й під час конденсації у середині мініканалів холодоагентів R22, R407C, R152a та ін.

Розрахунок тепловіддачі за напівемпіричною кореляцією з [2]

У висновках праць [4, 15] стосовно дослідження конденсації холодоагентів у мініканалах стверджується, що впродовж змінювання всього діапазону масового паровмісту коефіцієнти тепловіддачі для труби малого діаметра перевищують дані для труби зі звичайним діаметром приблизно на $\pm(10 - 25)\%$. За думкою авторів праць, це означає, що у разі зменшення діаметра труби ($d < 3 \text{ мм}$), у мініканалах відбуваються незначні зміни характеристик та структури потоку.

Тому, враховуючи порівняльний аналіз результатів досліджень тепловіддачі з рис. 1–4, а також висновки з зазначених вище робіт [4, 15] стосовно незначних змін характеристик і структур потоків під час конденсації речовин у середині мініканалів та невеликі відхилення отриманих результатів у порівнянні з розрахунками тепловіддачі за відомими кореляціями для звичайних труб, нами, за однакових робочих речовин, внутрішніх геометричних розмірів каналів і режимних параметрів, були проведені порівняльні розрахунки тепловіддачі за напівемпіричною залежністю (1) з роботи [2] для розрахунку конденсації у середині звичайних труб, яка заснована на теоретичній моделі турбулентної конденсації:

$$Nu_f = 0.0144 Fr_i^{0.36} Pr_i^{0.43} \quad (1)$$

У якості даних для розрахунку тепловіддачі, були обрані експериментальні дані досліджень теплообміну під час конденсації різних речовин у середині мініканалів з відомих робіт: [3] - конденсація R134a і R32 у круглих каналах; [4] – конденсація R134a, R404A та R407C у круглих каналах; [7] конденсація R134a у квадратному, трикутному і напівкруглому каналах; [12] - конденсація R22, R410A та пропану (R290) у круглих каналах; [13] - конденсація R22, R410A і R407C у круглих каналах; [15] - конденсація R32 у круглому каналі; [18] - конденсація R290 (пропан) у круглому каналі та ін.

Розрахунки тепловіддачі під час конденсації у середині мініканалів за залежністю (1) у порівнянні з експериментальними даними щодо конденсації холодоагентів R410A, R32, R290, R22 і R407C із робіт різних авторів за різною внутрішньою геометрією каналів приведені на рис. 5–8.

Аналіз рис. 5–8 свідчить, що запропонована комплексна модель (1), яка заснована на теоретичній моделі турбулентної конденсації, покращує опис експериментальних даних багатьох авторів у разі конденсації різних холодоагентів у середині мініканалів за умови, якщо число Re_l знаходиться у межах $Re_l = 2 \cdot 10^2 - 10^4$.

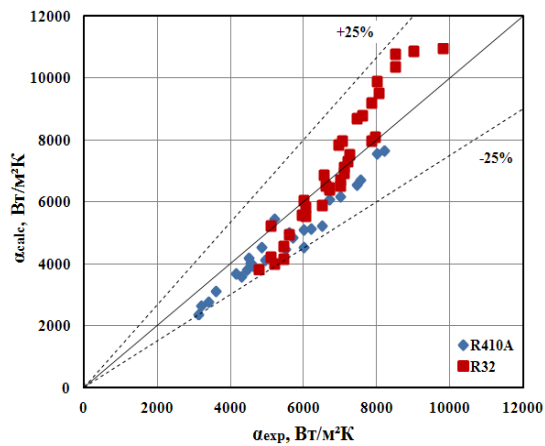


Рис. 5. Результати розрахунків за залежністю (1) даних [15] під час конденсації R410A і R32 у середині мініканалів із гідравлічним діаметром $d_h = 1,16$ мм

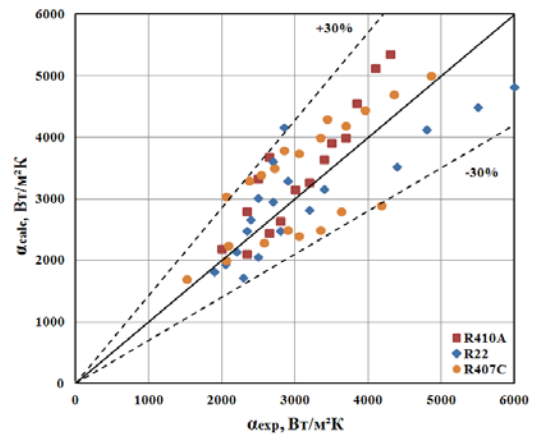


Рис. 6. Результати розрахунків за залежністю (1) даних [13] під час конденсації R410A, R22 і R407C у середині трубок із внутрішніми діаметрами $d_i = 1,088$ мм і $d_i = 1,289$ мм

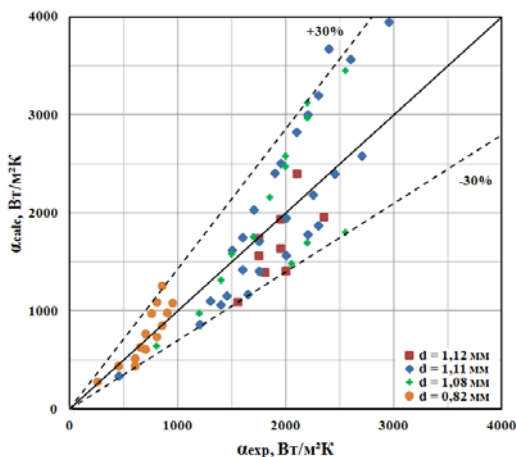


Рис. 7. Результати розрахунків за залежністю (1) даних із роботи [14] під час конденсації R410A у середині мініканалів із гідравлічними діаметрами $d_h = 0,82; 1,08; 1,11; 1,12$ мм

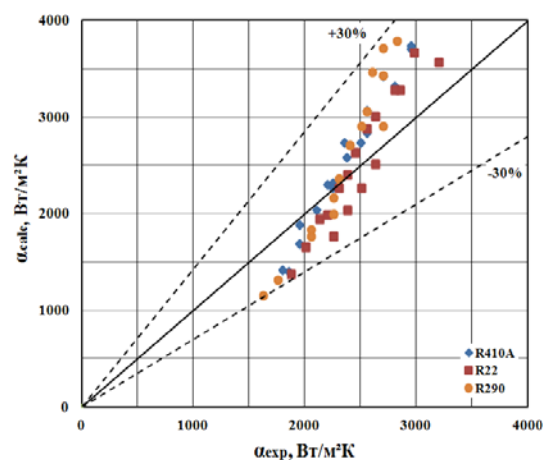


Рис. 8. Результати розрахунків за залежністю (1) даних із роботи [12] під час конденсації R410A, R22 і R290 у середині мініканалів із гідравлічним діаметром $d_h = 1,4$ мм

Висновки

1. Критичний аналіз експериментальних досліджень різних авторів під час конденсації холодоагентів R134a, R410A, R32 і R290 (propane), R22, R407C, R152a та ін. свідчить про те, що існує суттєва розбіжність у значеннях експериментальних коефіцієнтів тепловіддачі для кожного з холодоагентів у разі практично однакових масових швидкостей потоку і геометричних параметрах мініканалів.

2. Розрахунок тепловіддачі за напівемпіричною кореляцією (1) свідчить, що ця комплексна модель, яка заснована на теоретичній моделі турбулентної конденсації, покращує опис експериментальних даних багатьох авторів у разі конденсації різних холодоагентів у середині мініканалів за умови, якщо число Re_l знаходиться у межах $Re_l = 2 \cdot 10^2 - 10^4$.

3. У подальшому необхідно виконати порівняльні розрахунки за наявними теоретичними та емпіричними методами розрахунку теплообміну під час конденсації в середині мініканалів з метою виявлення загальної методики розрахунку тепловіддачі з урахуванням впливу режимів течії фаз, теплового потоку, а також границь її використання.

Література

1. Горін В. В. Теплообмін при конденсації всередині мініканалів / В. В. Горін // Холодильна техніка та технологія. – 2017. – № 5(53). – С. 21–26.
2. Rifert V. G. Substantiation and the range of application of a new method for heat transfer prediction in condensing inside plain tubes / V. G. Rifert, V. V. Sereda, V. V. Gorin, P. A. Barabash, A.S. Solomakha // ENERGETIKA: Scientific Journal of the Lithuanian Academy of Sciences. – 2018. – Vol. 64. – № 3. – P. 146–154.
3. Matkovic M. Experimental study on condensation heat transfer inside a single circular minichannel / M. Matkovic, A. Cavallini, D. Del Col, L. Rossetto // Int. J. Heat Mass Transfer. – 2009. – Vol. 52. – P. 2311 – 2323.
4. Bohdal T. Heat transfer during condensation of refrigerants in tubular minichannels / T. Bohdal, H. Charun, M. Sikora // Archives of Thermodynamics, 2016. – № 4. – P. 3–18.
5. Sakamatapan K. Condensation heat transfer characteristics of R-134a flowing inside themultiport minichannels / K. Sakamatapan, J. Kaew-On, A. S. Dalkilic, O. Mahian, S. Wongwises // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2013. – № 64. – P. 976–985.
6. Bandhauer T. M. Measurement and Modelling of Condensation Heat Transfer Coefficients in Circular

Microchannels / T. M. Bandhauer, A. Agarwal, S. V. Garimella // *J. of Heat Tran. T. ASME*. – 2006. – Vol. 128. – P. 1050–1059.

7. Derby M. Condensation heat transfer in square, triangular, and semicircular mini-channels. / M. Derby, H. J. Lee, Y. Peles, Michael, M. K. Jensen // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2012 – Vol. 55. – P. 187–197.

8. Col Del D. Minichannel condensation in downward, upward and horizontal configuration / D. Del Col, M. Bortolato, S. Bortolin, M. Azzolin // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2012. – Paper 395. – P. 1–8.

9. Riva E. The Importance of T turbulence during Condensation in a Horizontal Circular Minichannel / E. Da Riva, D. Del Col, S. V. Garimella, A. Cavallini // *CTRC Research Publications*. – 2011. – Paper 172. – P. 1 – 36.

10. Li M. Research on condensation heat transfer characteristics of R447A, R1234ze, R134a and R32 in multi-port micro-channel tubes / M. Li, Q. Guo, J. Lv // *12th IEA Heat Pump Conference*. – 2017. – P. 1–8.

11. Lopez Belchi A. Characterisation of heat transfere and pressure drop in condensation processes within minichannel tubes with last generation of the refrigerant fluids : dys. ... Ph. D. : Lopez Belchi Alejandro D. – Cartagena, 2014. – 167 p.

12. Park K. J. Flow Condensation Heat Transfer Coefficients of R22, R410A and Propane in Aluminium Multi-Channel Tube / K. J. Park, K. J. Lee, D. Jung // *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*. – 2005. – Vol. 17. – № 7. – P. 649–658.

13. Zhang H.-Y. Experimental investigation of condensation heat transfer and pressure drop of R22, R410A and R407C in mini-tubes / H.-Y. Zhang, J.-M. Li, N. Liu, B.-X. Wang // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2012. – Vol. 55. – P. 3522–3532.

14. Vu P. Q. Condensation heat transfer using R410A in multiport minichanel tubes // *Proceedings of the Asian Conference on Thermal Sciences, 1st ASTC March 26-30, (2017)*, pp. 1–6/

15. Lopez-Belchi A. R32 Heat Transfer Coefficient During Condensation In A Mini-Channel Multiport Tube. / A. Lopez-Belchi, F. Illan-Gomez, J.-R. Garcia-Cascales, F. Vera-Garcia // *15th International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue*, July 14 –17. – 2014. – 2488. – P. 1–10.

16. Bortolato M. Two-phase heat transfer inside minichannels: fundamentals and applications in refrigeration and solar technology : dys. ... Ph. D. : Bortolato Matteo. – Padova, 2014. – 182 p.

17. Liu N. Numerical simulation of R32 condensation heat transfer in horizontal circular microchannels / N. Liu, J. Li // *CIESC Journal*. – 2014. – Vol. 65. – P. 4246–4253.

18. Del Col, D., et al., Condensation Heat Transfer and Pressure Drop with Propane in a Minichannel, *International Refrigeration and Air Conditioning Conference, (2012)*, 2572, p. 1–9.

References

1. Horin V. V. Teploobmin pry kondensatsii vsередnyi minikanaliv / V. V. Horin // *Kholodylna tekhnika ta tekhnolohiia*. – 2017. – № 5(53). – S. 21–26.

2. Rifert V. G. Substantiation and the range of application of a new method for heat transfer prediction in condensing inside plain tubes / V. G. Rifert, V. V. Sereda, V. V. Gorin, P. A. Barabash, A.S. Solomakha // *ENERGETIKA: Scientific Journal of the Lithuanian Academy of Sciences*. – 2018. – Vol. 64. – № 3. – P. 146–154.

3. Matkovic M. Experimental study on condensation heat transfer inside a single circular minichannel / M. Matkovic, A. Cavallini, D. Del Col, L. Rossetto // *Int. J. Heat Mass Transfer*. – 2009. – Vol. 52. – P. 2311 – 2323.

4. Bohdal T. Heat transfer during condensation of refrigerants in tubular minichannels / T. Bohdal, H. Charun, M. Sikora // *Archives of Thermodynamics*, 2016. – № 4. – P. 3–18.

5. Sakamatapan K. Condensation heat transfer characteristics of R-134a flowing inside themultiport minichannels / K. Sakamatapan, J. Kaew-On, A. S. Dalkilic, O. Mahian, S. Wongwises // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2013. – № 64. – P. 976–985.

6. Bandhauer T. M. Measurement and Modelling of Condensation Heat Transfer Coefficients in Circular Microchannels / T. M. Bandhauer, A. Agarwal, S. V. Garimella // *J. of Heat Tran. T. ASME*. – 2006. – Vol. 128. – P. 1050–1059.

7. Derby M. Condensation heat transfer in square, triangular, and semicircular mini-channels. / M. Derby, H. J. Lee, Y. Peles, Michael, M. K. Jensen // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2012 – Vol. 55. – P. 187–197.

8. Col Del D. Minichannel condensation in downward, upward and horizontal configuration / D. Del Col, M. Bortolato, S. Bortolin, M. Azzolin // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2012. – Paper 395. – P. 1–8.

9. Riva E. The Importance of T turbulence during Condensation in a Horizontal Circular Minichannel / E. Da Riva, D. Del Col, S. V. Garimella, A. Cavallini // *CTRC Research Publications*. – 2011. – Paper 172. – P. 1 – 36.

10. Li M. Research on condensation heat transfer characteristics of R447A, R1234ze, R134a and R32 in multi-port micro-channel tubes / M. Li, Q. Guo, J. Lv // *12th IEA Heat Pump Conference*. – 2017. – P. 1–8.

11. Lopez Belchi A. Characterisation of heat transfere and pressure drop in condensation processes within minichannel tubes with last generation of the refrigerant fluids : dys. ... Ph. D. : Lopez Belchi Alejandro D. – Cartagena, 2014. – 167 p.

12. Park K. J. Flow Condensation Heat Transfer Coefficients of R22, R410A and Propane in Aluminium Multi-Channel Tube / K. J. Park, K. J. Lee, D. Jung // *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*. – 2005. – Vol. 17. – № 7. – P. 649–658.

13. Zhang H.-Y. Experimental investigation of condensation heat transfer and pressure drop of R22, R410A and R407C in mini-tubes / H.-Y. Zhang, J.-M. Li, N. Liu, B.-X. Wang // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2012. – Vol. 55. – P. 3522–3532.

14. Vu P. Q. Condensation heat transfer using R410A in multiport minichanel tubes // *Proceedings of the Asian Conference on Thermal Sciences, 1st ASTC March 26-30, (2017)*, pp. 1–6/

15. Lopez-Belchi A. R32 Heat Transfer Coefficient During Condensation In A Mini-Channel Multiport Tube. / A. Lopez-Belchi, F. Illan-Gomez, J.-R. Garcia-Cascales, F. Vera-Garcia // *15th International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue*, July 14 –17. – 2014. – 2488. – P. 1–10.

16. Bortolato M. Two-phase heat transfer inside minichannels: fundamentals and applications in refrigeration and solar technology : dys. ... Ph. D. : Bortolato Matteo. – Padova, 2014. – 182 p.

17. Liu N. Numerical simulation of R32 condensation heat transfer in horizontal circular microchannels / N. Liu, J. Li // *CIESC Journal*. – 2014. – Vol. 65. – P. 4246–4253.

18. Del Col, D., et al., Condensation Heat Transfer and Pressure Drop with Propane in a Minichannel, *International Refrigeration and Air Conditioning Conference, (2012)*, 2572, p. 1–9.

Рецензія/Peer review : 2.2.2019 р. Надрукована/Printed : 10.4.2019 р.

Рецензент: д. т. н., проф. Волощук В. А.

КІНЕМАТИЧНИЙ СИНТЕЗ ВАЖІЛЬНИХ МЕХАНІЗМІВ З ПОДВІЙНОЮ ЗУПИНКОЮ ВИХІДНОЇ ЛАНКИ

Робота присвячена проектуванню важільних механізмів, що забезпечують зупинку вихідної ланки в двох положеннях. Задача досліджень обґрунтовується тим, що важільні механізми є альтернативою іншим типам механізмів, які забезпечують переривчастий рух вихідної ланки, зокрема кулачковим, в яких присутність вищої кінематичної пари обмежує їх використання в ролі силових та швидкохідних. Тому розробка методів кінематичного синтезу важільних механізмів для забезпечення зупинок вихідної ланки є актуальною задачею. Основою запропонованого методу є пошук таких геометричних параметрів кінематичної схеми механізму, які забезпечать наявність двох особливих точок на шатунній кривій базового механізму. Створена база даних параметрів механізмів з подвійними зупинками, розроблене відповідне програмне забезпечення для проведення оптимізаційного пошуку за різними критеріями.

Ключові слова: шарнірний механізм, кінематичний синтез, подвійна зупинка, оптимізаційний пошук.

M. V. MARCHENKO, V. O. KHARZHEVSKIY

Khmelnytskyi National University

KINEMATIC SYNTHESIS OF LINKAGE MECHANISMS WITH DOUBLE DWELL OF THE OUTPUT LINK

The paper is dedicated to the problem of design of the linkage mechanisms with large dwell of the output link in two positions. The research task is so important due to the fact that linkage mechanisms can be successfully used instead of other types of mechanisms with the dwell of the output link, in particular – cam mechanisms. The presence of the higher kinematic pair in cam mechanisms is the reason of limitation of their work velocities and force transmission conditions. Thus, the development of the methods of linkage mechanisms' kinematic synthesis in order to satisfy the given law of motion with the prescribed dwells is a topical scientific and engineering task. The basis of the proposed method is to search such geometrical parameters of the kinematic scheme of the basic four-bar linkage which provide the presence of two points of straightening in the coupler curve with high order of contact with the tangent line. It enables to obtain two long dwells of the output link if to join the basic mechanism with the structural group of the II class of 3rd type. It is established that to find the vector of variable parameters is sufficient to find coordinates of the self-intersection or mutual intersection points of special points' curves in the coordinate system which is linked to the coupler plane of mechanism. As a result of carried researches, the database of the synthesized mechanisms' geometrical and kinematic parameters is created. The appropriate software that enables to carry out the optimization procedure with prescribed conditions is also developed. The numerical example that is obtained by means of the developed methods is also given.

Key words: linkage mechanism, kinematic synthesis, double dwell, optimization procedure.

У техніці існує багато прикладів механізмів, які забезпечують тривалу зупинку вихідної ланки в крайніх або проміжних її положеннях. Зокрема, до таких механізмів можна віднести кулачкові, мальтійські механізми, механізми неповних зубчастих коліс. Синтез зазначених груп механізмів зазвичай не викликає особливих труднощів, оскільки відповідні методи практично повністю розроблені. Особливим класом механізмів, які здатні забезпечити зупинку вихідної ланки, є важільні механізми. Вони, на відміну від інших типів, завдяки відсутності вищих кінематичних пар, характеризуються рядом переваг: високою зносостійкістю пар тертя, точністю позиціонування, швидкохідністю. Одним з недоліків важільних механізмів є значна кількість змінних параметрів синтезу, яка ускладнює задачу створення нових механізмів відомими методами. Проте, слід відзначити, що з розвитком числових методів та ростом розрахункових потужностей

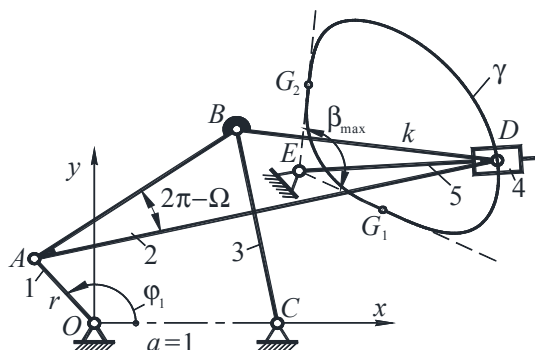


Рис. 1. Кінематична схема важільного механізму з двома вистоями вихідної ланки

комп'ютерної техніки згаданий недолік стає перевагою, оскільки відкриває можливість знаходження великої кількості векторів початкових параметрів, які б задовольняли б поставлені умови синтезу.

Відомо різні способи отримання двох наближених зупинок робочого органу машин-автоматів за допомогою шарнірно-важільних механізмів [1–5]. Проте, як зазначено в роботі [2], найважливішими з них є ті, які ґрунтуються на використанні двох ділянок шатунної кривої, що наближаються до прямої лінії або дуги кола сталого радіуса, і граничних положень трьох з'єднаних послідовно шарнірних чотириланкових механізмів.

На даний момент досить детально розроблені чисельно-аналітичні методи синтезу важільних механізмів, які забезпечують зупинку в одному крайньому положенні [6–9]. Основою запропонованих методів є знаходження в шатунній площині особливих точок (точок Болла [6, 7], Бурместера [7, 8, 10], точок розпрямлення четвертого та п'ятого порядків [7, 8]), траєкторії яких на певних своїх ділянках наближаються до прямої лінії чи дуги кола. Подальше приєднання до таких точок структурних груп II класу відповідного виду забезпечить зупинку вихідної ланки під час проходження

деякого околу особливої точки.

Аналіз шатунних кривих шарнірного чотириланкового механізму дозволив зробити припущення, що для заданих параметрів кінематичної схеми такого механізму може існувати декілька положень кривошипа, які б забезпечували одне й те ж положення особливої точки в його шатунній площині. Це б дало змогу отримати декілька ділянок розпрямлення на одній шатунній кривій, а значить і декілька тривалих зупинок вихідної ланки.

Отже, метою даної роботи є розробка методів знаходження таких шатунних кривих та параметрів механізмів, що їх забезпечують. Розглянемо важільний механізм $OABCDE$, в основі якого лежить шарнірний чотириланковий механізм $OABC$ (рис. 1). В кожному положенні його шатунної площини існує ряд особливих точок G_i , які є точками Болла, точками розпрямлення 4-го або 5-го порядку, що забезпечують з високою точністю наближення деякої ділянки шатунної кривої точки D до прямої лінії. Множина всіх особливих точок, побудованих для кожного положення механізму в нерухомій системі координат, що зв'язана зі стояком механізму, буде представляти собою криву особливих точок відповідного виду (криву Болла, криву точок розпрямлення 4-го або 5-го порядків). Сама по собі крива, побудована таким чином, носить лише теоретичне значення, оскільки не дає уявлення про дійсне положення особливої точки в шатунній площині. Іншу картину можна отримати, якщо побудувати таку криву в системі координат, що зв'язана з площиною шатуна AB (рис. 2). Очевидно, що точки самоперетину такої кривої відповідатимуть такому положенню шатунної точки D , яка забезпечить їй траєкторію з двома ділянками розпрямлення. Якщо ж побудувати одночасно дві криві для різних типів особливих точок, то точки їх перетину будуть точками, які будуть викреслювати дві наближено прямолінійні ділянки, але з різним порядком дотику до прямої лінії. І у першому, і в другому випадку механізм може бути використаний в ролі базового при проектуванні механізмів з двома тривалими зупинками.

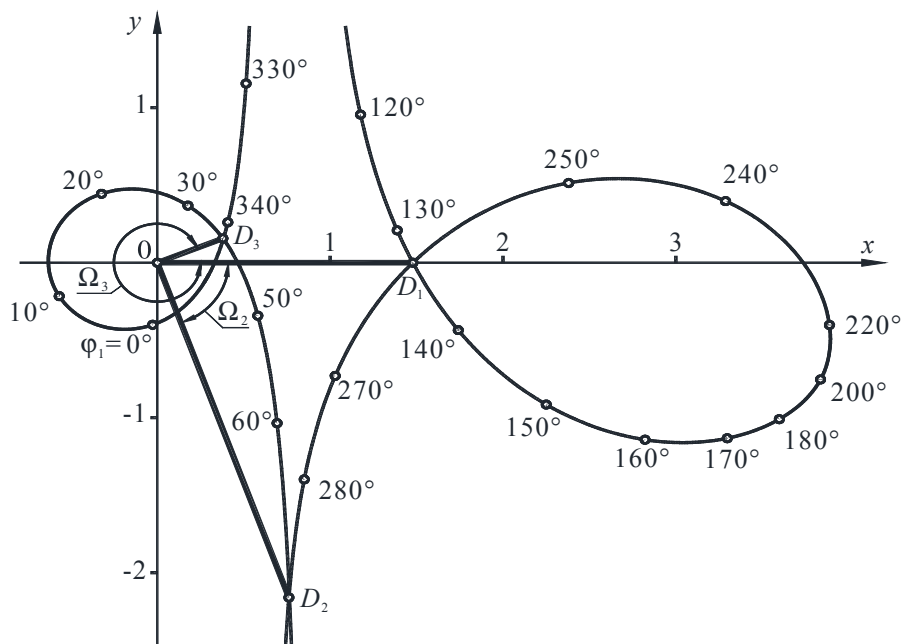


Рис. 2. Крива Болла шарнірного чотириланкового механізму, побудована в системі координат шатуна

Існують також такі поєднання параметрів кінематичної схеми, які забезпечують неоднократний самоперетин кривих особливих точок. Це, зокрема, означатиме, що на шатунній кривій є три ділянки розпрямлення. У зв'язку з малим прикладним значенням таких випадків для синтезу механізмів із зупинками (необхідно, щоб всі три прямі наближення перетинались в одній точці), такі випадки в даній роботі не розглядаються.

Подібний принцип був використаний в роботі [11] для синтезу базових напрямних кривошипно-кулісних механізмів на базі точок Болла. Але оскільки шарнірний чотириланковий механізм характеризуються більшою кількістю параметрів кінематичної схеми та кращими якісними характеристиками через відсутність поступальних кінематичних пар, то синтез механізмів саме на його базі є актуальною та перспективною задачею. Багатопараметричність такого типу важільних механізмів також є підґрунтям для використання пошукових методів при оптимізаційному синтезі.

Таким чином, основний принцип запропонованого методу синтезу зводиться до знаходження точок самоперетину кривих точок Болла та точок розпрямлення 4-го та 5-го порядків, що побудовані в шатунній площині механізму, а також визначення параметрів шатунних кривих, які описують знайдені точки. Оскільки криві особливих точок описуються функціями в неявному вигляді, то аналітичне знаходження точок самоперетину чи взаємного перетину є досить складною математичною задачею. У такому випадку зручно шукати координати цих точок, застосувавши числові методи, оскільки алгоритм їх знаходження є

відомим в будь-якому положенні механізму.

Для знаходження точок самоперетину та взаємного перетину кривих точок Болла та точок розпрямлення 4-го та 5-го порядків було використано чисельно-аналітичний метод, який ґрунтується на апроксимуванні зазначених кривих в околі очікуваного перетину ділянками парабол чи дуг кіл з подальшим аналітичним визначенням точок перетину цих ділянок. Розглянемо детальніше методику знаходження точок самоперетину, алгоритм якої зображений на рис. 3.

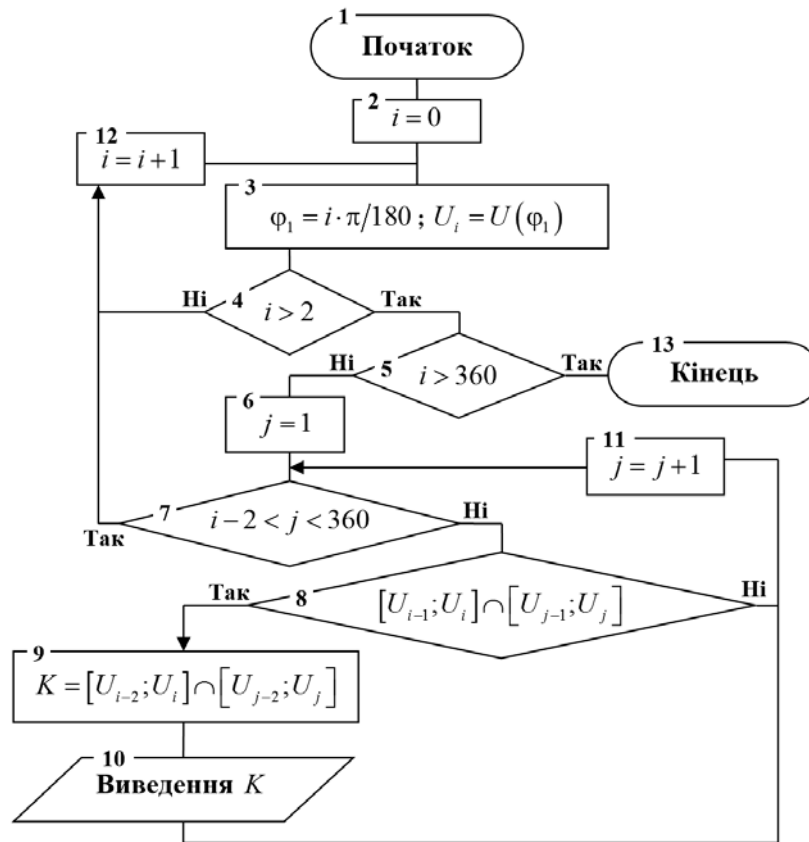


Рис. 3. Блок-схема алгоритму знаходження точок самоперетину кривої особливих точок

Визначення положення особливих точок проводилося для значення кута φ_1 повороту кривошипа в діапазоні $[0...2\pi]$ з кроком $\pi/180$. Після знаходження положень особливої точки в шатунній площині для перших трьох значень φ_1 (процедури 1-4, 12 на блок-схемі) проводилась перевірка умови (8 на блок-схемі) перетину кожної наступної i -тої ділянки кривої особливих точок з попередніми ($j \in [0, i-2]$).

Оскільки розрахунок координат кривих особливих точок проводився з досить малим кроком, то в околі самоперетину їх можна апроксимувати дугами кіл.

Як вже було зазначено, за криві апроксимації доцільно прийняти дуги кіл, які проходять відповідно через точки U_{i-2}, U_{i-1}, U_i та U_{j-2}, U_{j-1}, U_j (рис. 4, а). Точки перетину перпендикулярів, що проходять через середину відрізків $U_{i-2}U_{i-1}$, $U_{i-1}U_i$ та $U_{j-2}U_{j-1}$, $U_{j-1}U_j$ відповідно будуть центрами C_1 та C_2 дуг апроксимації, а їхні радіуси визначатимуться виразами:

$$r_1 = \sqrt{(x_{C_1} - x_{U_i})^2 + (y_{C_1} - y_{U_i})^2}; \quad r_2 = \sqrt{(x_{C_2} - x_{U_j})^2 + (y_{C_2} - y_{U_j})^2}. \quad (1)$$

Формули, за якими перевірялась умова перетину ділянок, мають вигляд:

$$\left. \begin{aligned} & \left[(x_{U_{j-1}} - x_{U_{i-1}})(y_{U_i} - y_{U_{j-1}}) - (y_{U_{j-1}} - y_{U_{i-1}})(x_{U_i} - x_{U_{j-1}}) \right] \times \\ & \times \left[(x_{U_j} - x_{U_{i-1}})(y_{U_i} - y_{U_{j-1}}) - (y_{U_j} - y_{U_{i-1}})(x_{U_i} - x_{U_{j-1}}) \right] \leq 0; \\ & \left[(x_{U_{i-1}} - x_{U_{j-1}})(y_{U_j} - y_{U_{j-1}}) - (y_{U_{i-1}} - y_{U_{j-1}})(x_{U_j} - x_{U_{j-1}}) \right] \times \\ & \times \left[(x_{U_i} - x_{U_{j-1}})(y_{U_j} - y_{U_{j-1}}) - (y_{U_i} - y_{U_{j-1}})(x_{U_j} - x_{U_{j-1}}) \right] \leq 0. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

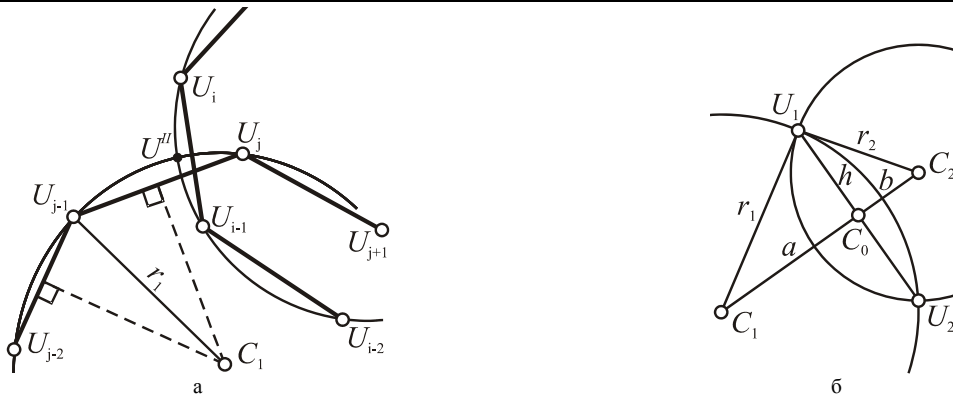


Рис. 4. Визначення точки перетину ділянок наближення

На рис. 4, б показаний випадок, коли пари особливих точок U_{i-1}, U_i та U_{j-1}, U_j задовольняють умову (2). Розглянемо $\Delta C_1 C_0 U_1$ та $\Delta C_2 C_0 U_2$. Для спрощення математичних викладок введемо наступні позначення: $a = C_1 C_0$, $b = C_2 C_0$, $d = C_1 C_2 = a + b$, $h = U_1 C_0 = U_2 C_0$.

Оскільки відрізок $U_1 U_2$ є спільною хордою кіл та $C_1 C_2$ – відрізок, що з’єднує центри цих кіл, то очевидно, що $\Delta C_1 C_0 U_1$ та $\Delta C_2 C_0 U_2$ є прямокутними з прямим кутом $\angle C_0$.

Визначимо невідомі довжини відрізків:

$$h^2 = r_1^2 - a^2; h^2 = r_2^2 - b^2 = r_2^2 - (d - a)^2 = r_2^2 - d^2 + 2da - a^2, \tag{3}$$

звідки $a = (r_1^2 - r_2^2 + d^2) / 2d$.

Координати точки C_0 :

$$x_{C_0} = x_{C_1} + a \frac{(x_{C_2} - x_{C_1})}{d}; y_{C_0} = y_{C_1} + a \frac{(y_{C_2} - y_{C_1})}{d}. \tag{4}$$

Координати точок перетину дуг кіл:

$$x_{U_{1,2}} = x_{C_0} \pm h \frac{(y_{C_2} - y_{C_1})}{d}; y_{U_{1,2}} = y_{C_0} \mp h \frac{(x_{C_2} - x_{C_1})}{d}. \tag{5}$$

Отже, точка самоперетину кривої особливих точок відповідатиме умові

$$U = \begin{cases} U_1 & \text{якщо } U_1 U_i < U_2 U_i; \\ U_2 & \text{інакше.} \end{cases} \tag{6}$$

Щоб збільшити точність знаходження координат точки самоперетину кривих особливих точок, апроксимаційні кола проводили спочатку через точки U_{i-2}, U_{i-1}, U_i та U_{j-2}, U_{j-1}, U_j , а потім – U_{i-1}, U_i, U_{i+1} та U_{j-1}, U_j, U_{j+1} . Це дало змогу остаточно розрахувати координати точки самоперетину як середину відрізка, який сполучає точки перетину першої та другої пари дуг апроксимації.

Визначивши таким чином положення точки самоперетину кривої особливих точок в шатунній площині механізму, розрахуємо довжину та кут злому шатуна:

$$k = \sqrt{x_U^2 + y_U^2}; \Omega = \arctg(y_U/x_U), 0 \leq \Omega < 2\pi. \tag{7}$$

Наведена вище методика дозволяє встановити в шатунній площині шарнірного чотириланкового механізму положення такої точки, траєкторія якої має дві ділянки розпрямлення, які визначаються точкою Болла, точкою розпрямлення 4-го або 5-го порядків. Такий механізм можна використати в ролі базового при синтезі механізмів з двома тривалими зупинками. Для визначення параметрів цих зупинок була застосована методика, наведена в роботі [7].

Оскільки практика проектування подібних механізмів передбачає синтез за заданим законом руху (заданою тривалістю однієї чи декількох зупинок вихідної ланки) з накладанням певних умов на геометричні, кінематичні та динамічні параметри, то виникає задача пошуку такого вектора параметрів кінематичної схеми, який би задовольняв всім поставленим умовам. Для визначення такої сукупності початкових параметрів проведено доповнення розробленого програмне забезпечення [12] (рис. 5), в якому використовується також методика, наведена у [13].

Згідно із зазначеною методикою, проводився аналіз законів руху вихідної ланки для забезпечення допустимого діапазону початкових значень, а отримані дані записувались до бази даних. Це дозволило встановити значення таких параметрів кінематичної схеми, що відповідають мінімуму цільової функції, за якою проводиться оптимізація. Заключним етапом синтезу є проведення спрямованого пошуку за допомогою оптимізаційного алгоритму Хука-Дживса, який дозволяє отримати остаточно значення

кінематичної схеми, які задовольняють всім поставленим до механізму вимогам.

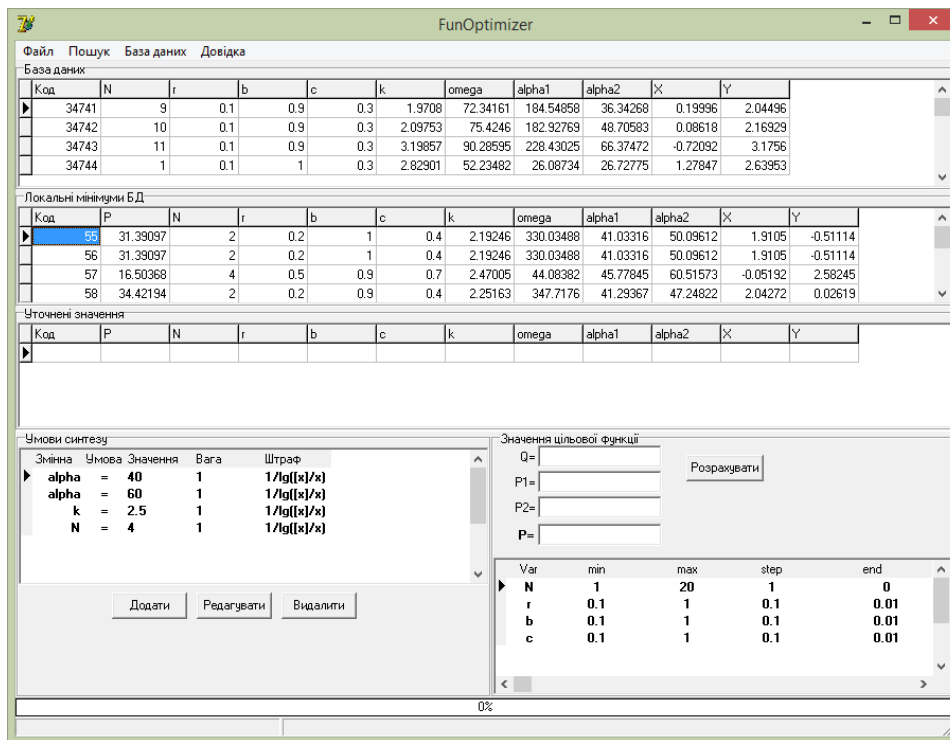


Рис. 5. Вікно програми для оптимізації параметрів шарнірно-важільних механізмів

Висновки

У результаті проведених досліджень розроблено методику синтезу важільних механізмів із подвійною зупинкою вихідної ланки, що побудовані на основі шарнірного чотириланкового механізму. Основою запропонованого методу є пошук таких точок в шатунній площині механізму, які є точками самоперетину або взаємного перетину кривих, що визначаються особливими точками (точками Болла, розпрямлення 4-го та 5-го порядків). Це дозволило отримати на шатунній кривій дві ділянки розпрямлення, а приєднання до відповідної шатунної точки групи II класу 3-го виду дає змогу синтезувати важільні механізми з двома тривалими зупинками вихідної ланки. Синтез за заданими умовами проводиться за допомогою оптимізаційних пошукових алгоритмів, що реалізовані за допомогою розробленого програмного забезпечення.

Література

1. Киницкий Я.Т. Шарнирные механизмы Чебышева с выстоем выходного звена / Я. Т. Киницкий. – К. : Вища школа, 1990. – 232 с.
2. Кикин А. Б. Разработка методов и средств для структурно-кинематического проектирования рычажных механизмов машин легкой промышленности : дисс. ... докт. техн. наук : 05.02.13 / А. Б. Кикин ; Санкт-Петербургский государственный университет технологий и дизайна. – Санкт-Петербург, 2006. – 362 с.
3. Хомченко В. Г. Аналитический синтез восьмизвенных рычажных механизмов с двумя остановками выходного звена с двумя присоединенными кулисными четырехзвенниками / В. Г. Хомченко // Теория механизмов и машин. – 1989. – Вып. 47. – С. 42–46.
4. Шарнірно-важільний механізм з двома регульованими зупинками вихідної ланки : деклараційний патент на винахід 66042 А України, МПК 7 F16H21/00 / В. О. Харжевський, Я. Т. Кіницький. – № 2003076659 ; заявлено 15.07.2003 ; опубліковано 15.04.2004, Бюл. № 4. – 2 с.
5. McCarthy J. Geometric Design of Linkages / McCarthy J., Soh G., Springer-Verlag. – 2nd edition. – New York, 2011. – 448 p.
6. Кіницький Я. Т. Синтез кривошипно-кулісних механізмів із зупинкою вихідної ланки на основі точок Болла / Я. Т. Кіницький, М. В. Марченко // Вісник Хмельницького національного університету. – 2007. – Т. 2, № 6. – С. 183–188.
7. Харжевський В. О. Синтез важільних механізмів із зупинкою вихідної ланки методами кінематичної геометрії : монографія / В. О. Харжевський. – Хмельницький : РВЦ ХНУ, 2015. – 223 с.
8. Харжевський В. О. Теорія синтезу важільних напрямних механізмів та побудованих та їх основі механізмів із зупинкою вихідної ланки : дис. ... докт. техн. наук : 05.02.02 / В.О. Харжевський. – Хмельницький національний університет, 2017. – 522 с.
9. Wang D. Kinematic Differential Geometry and Saddle Synthesis of Linkages / Wang D., Wang W. –

John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd., 2015. – 484 p.

10. Yin L. A General Method for Synthesizing Straight-Line Linkage with Ball and Burmester Points / L. Yin, J. Han, J. Huang, T. Yang // *Applied Mechanics and Materials*. – 2012. – Vol. 215-216. – P. 138–141.

11. Марченко М. В. Синтез кривошипно-кулісних механізмів із зупинкою вихідної ланки в крайніх положеннях / М. В. Марченко // *Машинознавство*. – 2008. – № 5. – С. 37–42.

12. Харжевський В. О. Використання важільних механізмів для забезпечення періодичної зупинки вихідної ланки та їх оптимізаційний кінематичний синтез / В. О. Харжевський, М. В. Марченко // *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки* – 2019. – № 1. – С. 7–11.

13. Марченко М. В. Оптимізаційний синтез кривошипно-кулісних механізмів з вистоем вихідної ланки / М. В. Марченко, О. О. Нікітін // *Вісник Хмельницького національного університету*. – 2008. – № 6. – С. 22–28.

References

1. Kinickij Ja.T. Sharnirnye mehanizmy Chebysheva s vystoem vyhodnogo zvena / Ja. T. Kinickij. – K. : Vishha shkola, 1990. – 232 s.

2. Kikin A. B. Razrabotka metodov i sredstv dlja strukturno-kinematicheskogo proektirovanija rychazhnykh mehanizmov mashin legkoj promyshlennosti : diss. ... dokt. tehn. nauk : 05.02.13 / A. B. Kikin ; Sankt-Peterburgskij gosudarstvennyj universitet tehnologij i dizajna. – Sankt-Peterburg, 2006. – 362 s.

3. Homchenko V. G. Analiticheskij sintez vos'mizvennykh rychazhnykh mehanizmov s dvumja ostanovkami vyhodnogo zvena s dvumja prisoedinennymi kulisnymi chetyrehzvennikami / V. G. Homchenko // *Teoriya mehanizmov i mashin*. – 1989. – Vyp. 47. – S. 42–46.

4. Sharnirno-vazhilnyi mekhanizm z dvoma reholovanyimi zupynkami vykhidnoi lanky : deklaratsiinyi patent na vynakhid 66042 A Ukrainy, MPK 7 F16H21/00 / V. O. Kharzhevskiy, Ya. T. Kinytskyi. – № 2003076659 ; zaiavleno 15.07.2003 ; opublikovano 15.04.2004, Biul. № 4. – 2 s.

5. McCarthy J. Geometric Design of Linkages / McCarthy J., Soh G., Springer-Verlag. – 2nd edition. – New York, 2011. – 448 p.

6. Kinytskyi Ya. T. Syntez kryvoshypno-kulisnykh mekhanizmv iz zupynkoiu vykhidnoi lanky na osnovi tochok Bolla / Ya. T. Kinytskyi, M. V. Marchenko // *Herald of Khmelnytskyi National University*. – 2007. – T. 2, № 6. – S. 183–188.

7. Kharzhevskiy V. O. Syntez vazhilnykh mekhanizmv iz zupynkoiu vykhidnoi lanky metodamy kinematychnoi heometrii : monohrafiia / V. O. Kharzhevskiy. – Khmelnytskyi : RVTs KhNU, 2015. – 223 s.

8. Kharzhevskiy V. O. Teoriia syntezu vazhilnykh napriamnykh mekhanizmv ta pobudovanykh ta yikh osnovi mekhanizmv iz zupynkoiu vykhidnoi lanky : dys. ... dokt. tekhn. nauk : 05.02.02 / V.O. Kharzhevskiy. – Khmelnytskyi natsionalnyi universytet, 2017. – 522 s.

9. Wang D. Kinematic Differential Geometry and Saddle Synthesis of Linkages / Wang D., Wang W. – John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd., 2015. – 484 p.

10. Yin L. A General Method for Synthesizing Straight-Line Linkage with Ball and Burmester Points / L. Yin, J. Han, J. Huang, T. Yang // *Applied Mechanics and Materials*. – 2012. – Vol. 215-216. – R. 138–141.

11. Marchenko M. V. Syntez kryvoshypno-kulisnykh mekhanizmv iz zupynkoiu vykhidnoi lanky v krainikh polozhenniakh / M. V. Marchenko // *Mashyno-znavstvo*. – 2008. – № 5. – S. 37–42.

12. Kharzhevskiy V. O. Vykorystannia vazhilnykh mekhanizmv dlja zabezpechennia periodychnoi zupynky vykhidnoi lanky ta yikh optymizatsiinyi kinematychni syntez / V. O. Kharzhevskiy, M. V. Marchenko // *Herald of Khmelnytskyi National University*. – 2019. – № 1. – S. 7–11.

13. Marchenko M. V. Optymizatsiinyi syntez kryvoshypno-kulisnykh mekhanizmv z vystoieim vykhidnoi lanky / M. V. Marchenko, O. O. Nikitin // *Herald of Khmelnytskyi National University*. – 2008. – № 6. – S. 22–28.

Рецензія/Peer review : 19.2.2019 р.

Надрукована/Printed : 10.4.2019 р.

Рецензент: д. т. н., проф. Стечишин М. С.

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ІМПУЛЬСНОГО РОЗПИЛЕННЯ РІДИНИ КОЛИВАЛЬНИМ СОПЛОМ

В статті розглядається модель розпилювача, що оснащена ультразвуковим концентратором для подрібнення рідини (розплаву полімеру). Проведено аналіз ультразвукової дії на потік рідини з урахуванням його розпилення в повітрі. Наведені математичні моделі залежності довжини хвилі від амплітуди та фізичних складових полімеру. Розроблена модель показала рух кавітаційних елементів вздовж лінії розпилення та дозволила визначити швидкість руху потоку та масу краплин, що утворюються.

Ключові слова: полімерні покриття, пристрої для нанесення, моделювання.

S. HORIASHCHENKO, K. HORIASHCHENKO

Khmelnytskyi National University

MODELING THE ULTRASONIC SPRAYER

The article considers the model of a sprayer equipped with an ultrasonic concentrator for grinding a liquid (molten polymer). An analysis of the ultrasonic effect on the fluid flow has been carried out, taking into account its spraying in the air. The mathematical models of the dependence of wave length on amplitude and physical components of a polymer are given. The developed model showed the motion of cavitation elements along the line of spraying and allowed to determine the velocity of the flow and the mass of the resulting droplets.

Key words: polymer coatings, devices for coating, modeling.

Вступ

Розглянемо процеси, що відбуваються в розпилювачах, а саме: розбиття краплин, спотворення та переміщення, турбулентної дисперсії, зіткнення/коалесценції краплин та пароутворення.

Ефект розбиття краплин у аерозолях вивчався Рейцем і Дівакар [1], який моделював експерименти на спреях порожнистих конусів з інвертором коливального сопла. В експериментах рідину вводили в спокійну зону з температурою при 307, 550, 1500 і 4712 кПа.

Використовуючи теорію розриву струменя, розглянемо циліндричну рідину струменя, що випускає з кругового отвору в стаціонарний нестискаємий газ. Досліджуємо стійкість поверхні рідини до лінійних обурень з метою визначення рівняння дисперсії. Рівняння (1) пов'язує швидкість зростання ω початкового збурення нескінченно малих амплітуд з її довжиною хвилі λ ($k=2\pi/\lambda$). Сюди також включити ребра фізичні та динамічні параметри рідкого струменя та навколишнього газу.

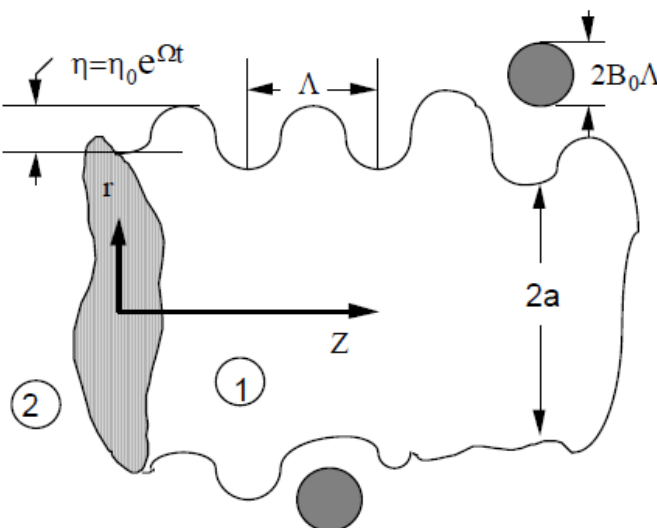


Рис. 1. Схематична діаграма, що показує поверхневі хвилі та розпад рідкого струменя на "краплі"

Як показано на рис. 1, стовпчик рідини вважається нескінченним в осьовому (z) напрямку і використовується циліндрична полярна система координат, яка рухається за відносною швидкістю рідини-газу $U=v-u$. Аналіз починається шляхом накладання на поверхню нескінченно малого асиметричного зсуву. Рівняння поверхні рідини: $r=a+\eta$, з (див. рис. 1)

$$\eta = R\eta_0 e^{ikz + \omega t} \quad (1)$$

де η_0 – початкова амплітуда збурень, a – неперервний радіус струменя.

Пов'язана з порушенням цього малого осесиметричного флуктуаційного тиску, p , осьова швидкість,

u і радіальна швидкість, v для як рідких, так і газових фаз, позначені $i=1$ і 2 , відповідно. Ці коливання описуються рівнянням безперервності $\frac{\partial u_i}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rv_i) = 0$

Лінеаризовані рівняння руху рідини та газу, що підпадають під граничні умови на інтерфейсі, що включають стан кінематичного стрибка, можуть бути описані рівнянням [3]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_i}{\partial t} + U_i(r) \frac{\partial u_i}{\partial z} + v_i \frac{dU_i}{dr} &= \frac{-1}{\rho_i} \frac{\partial p_i}{\partial z} + \frac{\mu_i}{\rho_i} \left[\frac{\partial^2 u_i}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u_i}{\partial r} \right) \right] \\ \frac{\partial v_i}{\partial t} + U_i(r) \frac{\partial v_i}{\partial z} &= \frac{-1}{\rho_i} \frac{\partial p_i}{\partial z} + \frac{\mu_i}{\rho_i} \left[\frac{\partial^2 v_i}{\partial z^2} + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial rv_i}{\partial r} \right) \right] \end{aligned} \quad (2)$$

Нормальний розподіл напружень визначає поверхневий натяг, динамічний тиск (інерція), в'язкі (нормальні) сили та віддачі (через пари, що залишає інтерфейс випаровуючого струменя).

Основна частина

У тангенціальному балансі напруження струменя газ, як правило, вважається невідомим, тобто передбачається, що він діє на межі рідина-газ. Таким чином, це припущення не дозволяє забезпечити наявність зсуву в прикордонному шарі в потоці газу на межі. Рідинні гідродинамічні рівняння розв'язуються з рішеннями

$$\varphi_i = C_1 I_0(kr) \exp(ikz + \omega t) \text{ and } \psi_i = C_2 r I_1(lr) \exp(ikz + \omega t), \quad (3)$$

де ψ_i – функція потоку, φ_i – потенціал швидкості, C_1 та C_2 – константи інтеграції, $l_2 = k_2 + \omega / v_1$, v_1 – рідка кінематична в'язкість, а I_0 та I_1 – модифіковані функції Бесселя першого роду. Тиск рідини знаходиться з формули:

$$p_1 = -\rho_1 \partial \varphi_1 / \partial t, \quad (4)$$

де ρ_1 – щільність рідини.

З припущенням, що $\eta \ll a$, отримуємо рівняння для тиску газу на межі $r=a$, коли передбачається, що газ невідомий (K_0 та K_1 – модифіковані функції Бесселя другого роду), а U – відносна швидкість між струменем і газом:

$$p_2 = -\rho_2 \left(U - i \frac{\omega}{k} \right)^2 k \eta \frac{K_0(ka)}{K_1(ka)} \quad (5)$$

Кінематичні, тангенціальні та нормальні рівняння напружень на межі зменшуються до значень: $v_1 = w = \frac{\partial \eta}{\partial t}$, $\frac{\partial u_1}{\partial r} = \frac{-\partial v_1}{\partial z}$, що дає можливість для усунення C_1 і C_2 тоді

$$-p_1 + 2V_1 \rho_1 \frac{\partial v_1}{\partial r} - \frac{\sigma}{a^2} \left(\eta + a^2 \frac{\partial^2 \eta}{\partial z^2} \right) + p_2 = 0, \quad (6)$$

де u_1, v_1 – осові та радіальні компоненти швидкості рідини, а під час застосування розв'язків швидкості та тиску в рівнянні (6), це призводить до дисперсійного співвідношення [8]

$$\begin{aligned} \omega^2 + 2v_1 k^2 \omega \left[\frac{I_1'(ka)}{I_0(ka)} - \frac{2kl}{k^2 + l^2} \frac{I_1(ka)}{I_0(ka)} \frac{I_1'(la)}{I_0(la)} \right] &= \frac{\sigma k}{\rho_1 a^2} (1 - k^2 a^2) \left(\frac{l^2 - k^2}{l^2 + k^2} \right) \frac{I_1(ka)}{I_0(la)} + \\ &+ \frac{\rho_2}{\rho_1} (U - i\omega/k)^2 k^2 \left(\frac{l^2 - k^2}{l^2 + k^2} \right) \frac{I_1(ka) K_0(ka)}{I_0(la) K_1(ka)} \end{aligned} \quad (7)$$

Розв'язок рівняння (7) показує прогнозовані темпи зростання хвилі у порівнянні з бездоганною довжиною хвилі струменя залежно від чисел Вебера та Онезорге We_2 і Z . Результати показують, що існує максимальна швидкість зростання хвилі Ω , що відбувається при довжині хвилі Λ . Максимальна швидкість росту хвиль та відповідна довжина хвилі характеризують найбільш швидко зростаючі (або найбільш імовірні) хвилі на поверхні рідини, які, як вважається, в кінцевому підсумку відповідають за розпад.

Можна згенерувати кривизну для численних рішень до рівняння (7) для максимальної швидкості росту ($\omega = \Omega$) та для відповідної довжини хвилі ($\lambda = \Lambda$):

$$\frac{\Lambda}{a} = 9.02 \frac{(1 + 0.45Z^{0.5})(1 + 0.4T^{0.7})}{(1 + 0.87We_2^{1.67})^{0.6}} \quad (8)$$

$$\Omega \left(\frac{\rho_1 a^3}{\sigma} \right)^{0.5} = \frac{0.34 + 0.38We_2^{1.5}}{(1 + Z)(1 + 1.4T^{0.6})} \quad (9)$$

$$Z = \frac{We_1^{0.5}}{Re_1}; T = ZWe_2^{0.5}; We_1 = \frac{\rho_1 U^2 a}{\sigma}; We_2 = \frac{\rho_2 U^2 a}{\sigma}; Re_1 = \frac{Ua}{\nu_1}$$

Значення рівняння (8) та (9) показані на рис. 3. Як видно, максимальна швидкість зростання хвилі зростає, а відповідна довжина хвилі швидко зменшується з збільшенням числа Вебера. Вплив в'язкості зменшує швидкість росту хвилі і значно збільшує довжину хвилі, оскільки збільшується рідка в'язкість.

Рівняння (9) також використовується в якості основи для організації режиму розриву струменя. При низьких числах Вебера We_2 розрив відбувається в режимі Релея (рис. 3), а розміри краплин більші, ніж діаметр струменя. У цьому випадку в нормальному рівнянні (рис. 4) існує баланс між інерцією (тобто динамічним тиском рідини) та значенням поверхневого натягу. Поверхня струменя нестабільна для всіх хвильових чисел з $k_a < 1$, а максимальна швидкість росту має місце при $\Lambda = 9.02$ (якщо у формулу (8) підставити $We_2 = 0$ і $T = 0$). Поняття в'язкої нормальної напруги передбачає включення в'язкості рідини через число Онезорге, Z . Це переміщує найбільш нестабільну хвилю до довших довжин хвиль, але умова розриву струменя залишається дестабілізуючою комбінацією поверхневого натягу та сил інерції. Значення в'язкості рідини має вторинний стабілізуючий ефект і в інших режимах розпаду.

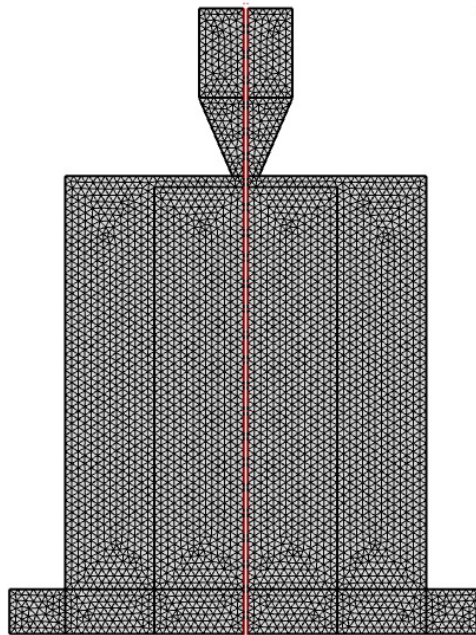


Рис. 2. Обчислювальна сітка, що показує розташування сопла та зони розпилення

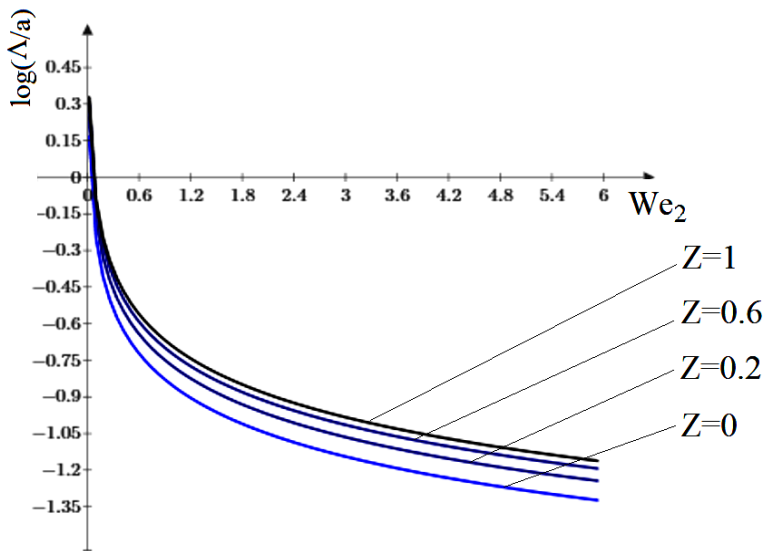


Рис. 3. Довжина хвилі швидкості росту як функція числа Z

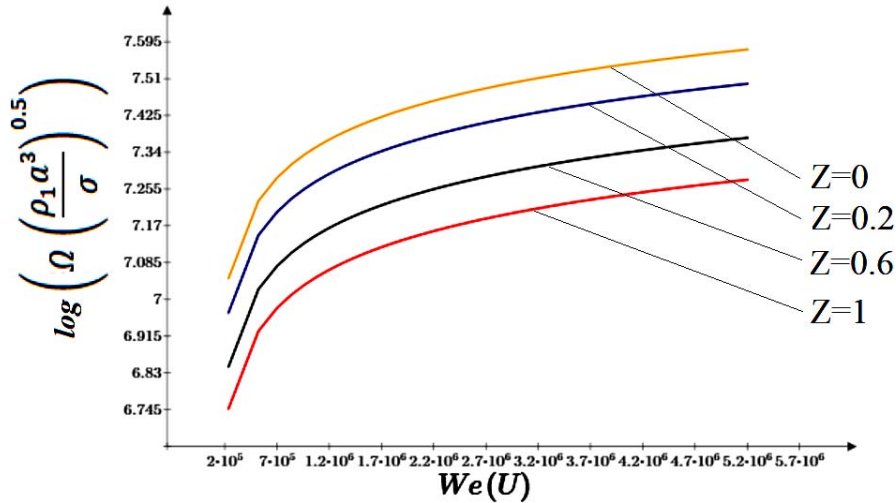


Рис. 4. Довжина хвилі у найбільш нестабільній поверхневій хвилі проти числа Вебера, We_2 , як функція числа Z

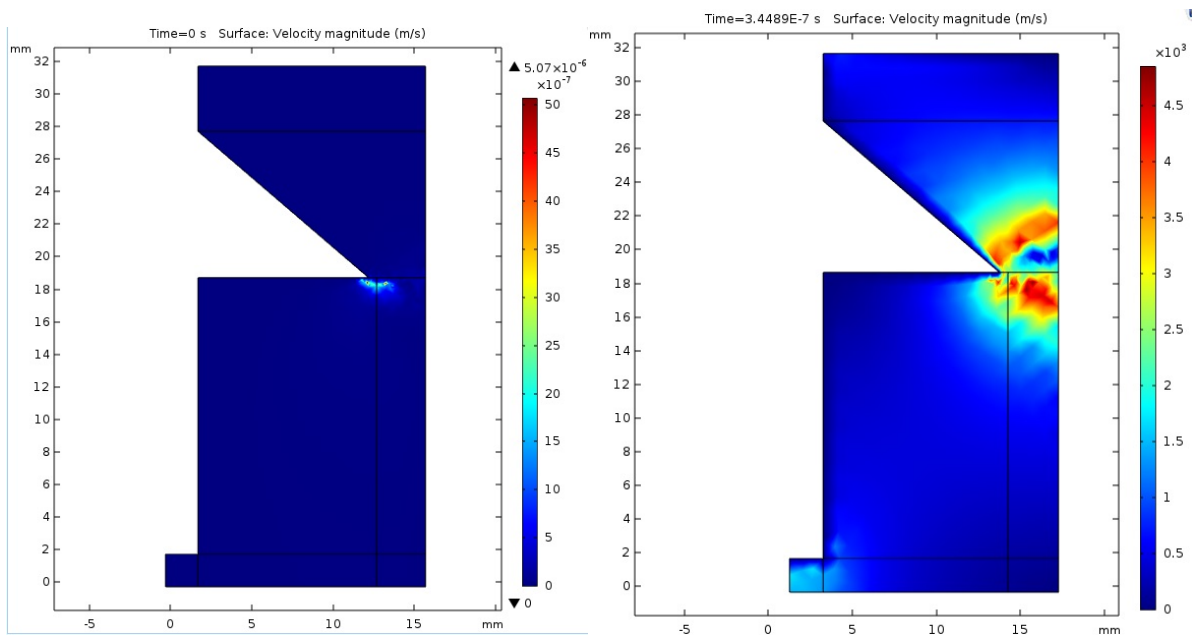


Рис. 5. Значення тиску в соплі на 1.0 і 2.0 мс після початку розпилення

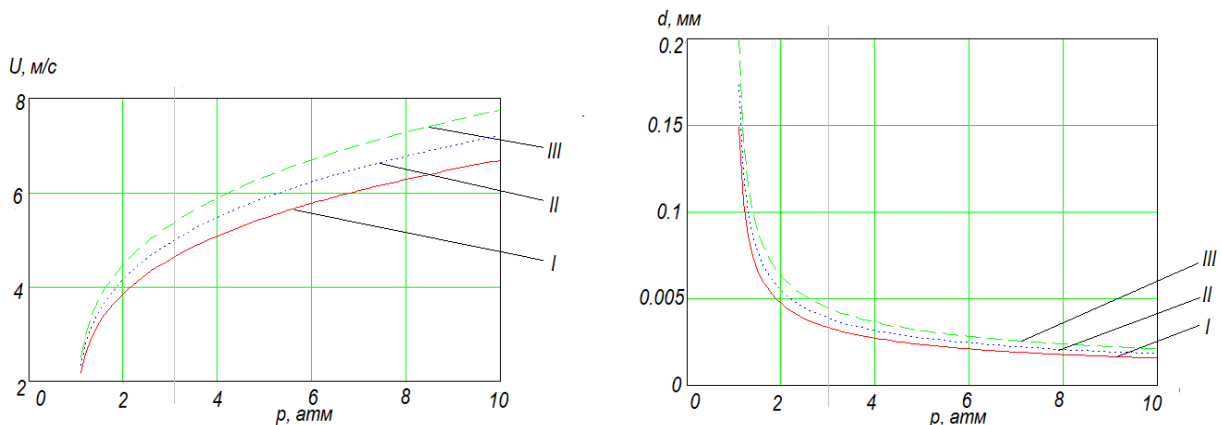


Рис. 6. Порівняння експериментальних (верхніх кадрів) та обчислюваних (нижніх кадрів) спреїв. 0,222 мс між кадрами

Отримані дані дозволяють моделювати сопло, зазначивши такі параметри: кут повного конуса сопла $\theta=60$, діаметр сопла $\delta=2,4$ мм (див. рис. 5). Швидкість потоку становила 0,0165 м/с. Розпилення з чотирма імпульсами, кожен з тривалістю близько 0,58 мс, як визначено з виміряного тиску нагнітання рідини, показано на рис. 6. Швидкість розпилення була отримана з експериментальних вимірювань швидкості потоку. Розмір введених крапель був отриманий з кореляції розриву листів, рівняння (9), враховуючи синусоїдальний варіант підйому (або товщини аркуша) з часом, а максимальний підвіс для скочвання був

виявлений з вимірюваного витрати палива та швидкості подачі.

Обчислення проводились за допомогою Comsol Multiphysics. Як показано на рисунку 5, форсунка розташована у верхній частині обчислювального домену. Результати, що показують поле швидкості, утворені взаємодією крапель з газом, і проникнення крапель в камеру в 2,0 мс після початку розпилення наведені на рис. 7, а,б, відповідно. Як видно, вихор, як передбачається, присутній у газі на кінці імпульсного аерозоля. Імпульсне розпилення призводить до кластеризації крапель і має ефект збільшення радіальної протяжності проникнення та змішування. Область у тилі голови спрею містить невеликі захоплені краплі.

Висновки

Інерційний ефект навколишнього газу впливає в міру збільшення числа Вебера We_2 . Як видно з рівняння (9), це підвищує швидкість зростання хвилі, але розміри крапель досі залишаються рівними діаметра струменя при незначному значенні тиску газу в соплі (рис 7,б). З подальшим збільшенням We_2 , ефект інерції газу збільшується. Максимальна швидкість росту виникає при поступовому зменшенні довжини хвиль, і, врешті-решт, розпад відбувається через нестабільне зростання поверхневих хвиль, які мають коротку довжину хвилі. Краплі утворюються з розмірами набагато менше, ніж діаметр струменя. Рівняння (8) та (9) стають незалежними від діаметра струменя, коли параметр We_2 стає досить великим.

Остаточний режим, режим розпилення, досягається при високому граничному числі Вебера, коли щільність газу досить висока. Це режим аерозолів високого тиску, де розрив починається з виходу сопла. Попередні дослідження показують, що теорія поверхневих хвиль може застосовуватися до струменів у такому режимі розпилення. Проте пряма перевірка цього механізму за допомогою експерименту ще не була можлива, оскільки густий спрей, який оточує струмінь, затуманює деталі розриву.

Випаровування, як відомо, дестабілізує струми низької швидкості та стабілізує високошвидкісні струмені, а нестабільне зростання поверхневих хвиль відповідає за розрив у випадку швидкого розриву струменя. У цьому випадку не можна обґрунтовано враховувати в'язкість безперервної фази в тангенціальних та нормальних балансах напруги на межі розподілу фаз.

Результати аналізу стабільності струменя можуть бути використані для оцінки розмірів крапель, сформованих під час процесу розпилення, припускаючи, що розмір краплі лінійно пов'язаний з довжиною хвилі λ .

Література

1. Reitz, R.D. and Bracco, F.V., "Mechanism of Atomization of Liquid Jets," *The Physics of Fluids*, Vol. 25, p. 1730, 1982. <https://doi.org/10.1063/1.863650>
2. Хмелев В.Н. Применение ультразвука высокой интенсивности в промышленности / В.Н. Хмелев, А.Н. Сливин, Р.В. Барсуков, С.Н. Цыганок, А.В. Шалунов ; Алт. гос. техн. ун-т, БТИ. – Бийск : Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2010. – 203 с.
3. Sheng C.D. Modelling Acoustic Agglomeration Processes Using Direct Simulation Monte Carlo Method / C.D. Sheng, X.L. Shen // *Journal of Aerosol Science*. – 2006. – Issue 37. – P. 16–36.
4. Vytautas Ostasevicius, Vytautas Jurenas, Rimvydas Gaidys, Ievgeniia Golinka. Vibroacoustic handling and levitation of microparticles in air. JVE International Ltd. Vibroengineering PROCEDIA. Dec 2017, Vol. 15. ISSN 2345-0533 h/100-105
5. Serhiy Horyashchenko, Ievgeniia Golinka. Simulation of particle flow of the polymer droplets using ultrasonic spraying. 22th International Scientific Conference: Mechanika 2017 – Proceedings. Kaunas. P. 134–137.
6. Горященко С.Л. Моделирование краплін при розпиленні двофазного потоку соплом / С.Л. Горященко // Вісник Хмельницького національного університету. – 2016. – № 3. – С. 282–285.
7. Numerical study on the effect of nozzle pressure and yarn delivery speed on the fiber motion in the nozzle of Murata vortex spinning. *Journal of Fluids and Structures* 27 (2011), 121–133.

References

1. Reitz, R.D. and Bracco, F.V., "Mechanism of Atomization of Liquid Jets," *The Physics of Fluids*, Vol. 25, p. 1730, 1982. <https://doi.org/10.1063/1.863650>
2. Hmelev V.N. Primenenie ultrazvuka vysokoj intensivnosti v promyshlennosti / V.N. Hmelev, A.N. Slivin, R.V. Barsukov, S.N. Cyganok, A.V. Shalunov ; Alt. gos. tehn. un-t, BTI. – Bijsk : Izd-vo Alt. gos. tehn. un-ta, 2010. – 203 с..
3. Sheng C.D. Modelling Acoustic Agglomeration Processes Using Direct Simulation Monte Carlo Method / C.D. Sheng, X.L. Shen // *Journal of Aerosol Science*. – 2006. – Issue 37. – P. 16–36.
4. Vytautas Ostasevicius, Vytautas Jurenas, Rimvydas Gaidys, Ievgeniia Golinka. Vibroacoustic handling and levitation of microparticles in air. JVE International Ltd. Vibroengineering PROCEDIA. Dec 2017, Vol. 15. ISSN 2345-0533 h/100-105
5. Serhiy Horyashchenko, Ievgeniia Golinka. Simulation of particle flow of the polymer droplets using ultrasonic spraying. 22th International Scientific Conference: Mechanika 2017 – Proceedings. Kaunas. P. 134–137.
6. Horiashchenko S.L. Modeliuvannia kraplyn pry rozpylenni dvofaznogo potoku soplom / S.L. Horiashchenko // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2016. – № 3. – S. 282–285.
7. Numerical study on the effect of nozzle pressure and yarn delivery speed on the fiber motion in the nozzle of Murata vortex spinning/ *Journal of Fluids and Structures* 27 (2011) 121–133.

Рецензія/Peer review : 26.2.2019 р.

Надрукована/Printed : 11.4.2019 р.

Рецензент: к.т.н. Поліщук О. С.

ТЕХНОЛОГІЇ ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

DOI 10.31891/2307-5732-2019-271-2-72-75
УДК 687.17:620.193

Н. В. МИХАЙЛОВА

Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля, м. Северодонецьк
В. О. ПРИВАЛА
Хмельницький національний університет

ОСОБЛИВОСТІ ОЦІНЮВАННЯ ЗАХИСНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ІЗОЛЮЮЧОГО КОСТЮМА ПРАЦІВНИКІВ ХІМІЧНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

В статті проаналізовано різні підходи до методики вивчення і оцінки захисних властивостей спеціальних матеріалів, які використовують під час виготовлення захисного одягу працівників вітчизняної хімічної промисловості. Запропоновано функціонально-логічну схему вибору і оцінки захисних властивостей спеціальних матеріалів для виготовлення ізолюючого костюму. Використання даної розробки дозволяє спростити і оптимізувати процес проектування спецодягу для працівників різних підвидів хімічної промисловості.

Ключові слова: хімічна промисловість, закриті ємності, умови праці, шкідливі умови, агресивне середовище, безпека життя, ізолюючий костюм, проектування одягу.

N. V. MIHAILOVA

Volodymyr Dahl Eastern National University, Severodonetsk
V. O. PRIVALA
Khmelnyskyi National University

FEATURES OF ASSESSING PROTECTIVE PROPERTIES OF MATERIALS FOR THE ISOLATING CLOTH OF CHEMICAL INDUSTRY EMPLOYEES

Creating effective personal protective equipment depends largely on the quality of the materials used. It is at this stage in the design of protective suits that difficulties arise for researchers. This is due to the divergence of theoretical approaches in the selection of protective materials and practical results of studies of their properties. This is especially important when choosing materials to be used in an aggressive environment and when exposed to a complex of factors (dynamic bending, low temperatures, chemical active medium, etc.). To streamline the methodology for selecting the necessary materials for protective suits, the authors of the flock proposed a functional-logic diagram of the choice and evaluation of the protective properties of special materials. The use of this scheme is optimized process design for special equipment for practical purposes.

Key words: chemical industry, closed capacities, working conditions, harmful conditions, aggressive environments, safety of life, insulating suit, designing of clothes.

Вступ

На підприємствах хімічної галузі проблема забезпечення робітників спеціальним одягом, який надійно захищав би від впливу агресивних речовин різного походження, що вважаються небезпечними та шкідливими виробничими факторами (НШВФ), може бути причиною не тільки травм і хімічних опіків, але й призвести до летальних наслідків. Тому існує необхідність у створенні ізолюючого костюму (ІК), який буде бар'єром, перешкоджаючим проникненню мінеральних кислот, лугів, окиснювачів, розчинів солей, аміаку тощо різних концентрацій за необхідного рівня забезпечення і збереження таких основних захисних показників, як хімічна стійкість, непроникність і герметичність виробу в цілому.

Постановка задачі

З метою обґрунтування вибору показників процесу вивчення і оцінки захисних властивостей спеціальних матеріалів ізолюючих костюмів зазвичай вибирають НШВФ, які найбільш часто зустрічаються і впливають на апаратника, а також робочого-слюсаря в процесі підготовки і власне очищення закритих ємностей. Аналіз умов праці зазначених професій свідчить про те, що до основних агресивних чинників, які постійно впливають на засоби індивідуального захисту (ЗІЗ), слід віднести сірчану, соляну, азотну, фосфорну кислоти, луги та аміак різних концентрацій. З урахуванням відомих хімічних властивостей перерахованих реагентів є цілком логічним те, що ІК повинен бути виготовлений з кислото- і лугозахисного матеріалу з полімерним покриттям, наприклад з полівінілхлоридним (ПВХ) покриттям, що підтвердили результати експериментів. Однак, якщо врахувати, що в переліку НШВФ присутній рідкий аміак, то матеріал з ПВХ покриттям не може виконати захисних функцій через його недостатню зносостійкість за низьких температур. Появу цих температур можна пояснити виходячи з того, що аміак, маючи низьку температуру кипіння ($-33,4^{\circ}\text{C}$), здатний до підвищеної швидкості випаровування, особливо при плюсовій температурі навколишнього повітря, таким чином охолоджуючи контактні поверхні від -40°C до -67°C . Тому, коли виробу піддають ще й незначному обливанню рідким аміаком, то в місцях контакту вони різко охолоджуються, що може призвести не тільки до істотної зміни його структурно-морфологічних характеристик (усадка, втрата еластичності, утворення тріщин, руйнування полімерного покриття та інше), але і до зменшення захисних функцій. Таким чином, зазначений матеріал не є рішенням поставленої вище завдання, а необхідність вибору підходящого спецматеріалу для ізолюючих костюмів залишається актуальною.

Аналіз літературних джерел

Аналіз наукових робіт з розробки ізолюючих захисних костюмів для робітників хімічної промисловості дозволив зробити висновок щодо наявності незначної кількості матеріалів, які знаходяться у вільному доступі. В основному доступна комерційна інформація, в якій наводиться лише детальний опис технічних можливостей вже готових ІК та їх ціна для продажу. Наприклад, в роботах [1–4] та ін. описані зовнішній вигляд та технічні можливості захисних ізолюючих костюмів як закордонного, так і вітчизняного виробництва. При цьому повністю відсутня інформація щодо науково-технічних аспектів їх створення. Крім того достовірно відомо, що задекларовані в супроводжувальній рекламній документації можливості даної продукції, при проходженні процедури сертифікації українськими державними експертними установами, не завжди отримують експериментальне підтвердження. Оскільки даний напрям створення ЗІЗ поставлений на комерційну основу, то й будь-яка інформація щодо методики їх створення є комерційною таємницею. Лише незначна частина наукових робіт, наприклад [5, 6], дозволяє залучитися до процесу розробки методології створення захисних костюмів для робітників хімічної промисловості. Отже, закритість інформації даного спрямування не дозволяє скористатися існуючим міжнародним досвідом і потребує самостійного проходження процесу проектування ІК від першого етапу до останнього.

Викладення основного матеріалу

Найбільш придатними для створення ізолюючих костюмів, на перший погляд, є спеціальні матеріали з ПВХ покриттям, про що свідчать результати ряду наукових робіт [7–10]. Сутність досліджень полягала в тому, щоб з трьох зразків штучних шкір, що відрізняються природою полімерного покриття, обрати той, який був би стійким до впливу мінеральних кислот і мав гарну стійкість до згинання (до 20 тисяч циклів) за низьких (-40°C) температур. Аналіз результатів експериментів показав, що найбільш кислотостійким матеріалом при прямому контакті з 80-відсотковою сірчаною кислотою можна вважати вінілову штучну шкіру-Т. Однак, в ході вивчення показників стійкості до згинання методом «ромба» виявилось, що вже при температурі -20°C проба зруйнувалася за 7 циклів. Таким чином, незважаючи на позитивні результати по кислотостійкості, пробу слід визнати такою, що не пройшла випробування, оскільки другий показник – стійкість до згинання – виявився дуже низьким.

Тому, з урахуванням результатів проведеного аналізу робіт [8–10], авторами даного дослідження розроблена функціонально-логічна схема вибору і оцінки захисних властивостей спеціальних матеріалів для виготовлення ІК для використання в закритих ємностях (рис. 1).

Методологічно, сутність запропонованої схеми полягає в тому, щоб за допомогою найбільш «активного» фактору, що входить до переліку ОВПФ конкретного хімічного виробництва, була можливість з мінімальною втратою часу і коштів вибрати з наявного переліку асортименту той необхідний матеріал, який відповідає технічним вимогам для ЗІЗ.

Якщо проаналізувати небезпечні та шкідливі виробничі фактори в нашому випадку, то наявність мінеральних кислот і лугів, в тому числі і концентрованих, мала б суперечити розробленій функціонально-логічній схемі, оскільки гідроліз як фізико-механічний процес і стійкість до згинання проб за низьких температур як фізико-механічний процес, по відношенню до полімерних матеріалів, мають різні природу і закономірності [11–16]. Однак, якщо врахувати результати науково-дослідної роботи [14], то найбільш «активним» фактором, що дає можливість науково-обґрунтовано проводити експерименти, був обраний такий показник, як стійкість до згинання проб при низьких (-40°C) температурах (рис. 1, поз. 1).

Тому, після отримання необхідних значень на складний «ромбоподібний» вигин, наприклад, 10 тисяч циклів при постійному впливі -40°C , проби спеціального матеріалу вивчаються на морозостійкість при цій же температурі, але тільки в статичних умовах. Вивчення морозостійкості проводиться відповідно до умов, передбачених стандартом [17]. У зв'язку з цим, відповідно до структури запропонованої схеми, морозостійкість, як показник, проводиться в режимі «заморожування – розморожування» (рис. 1, поз. 2).

Після того, як за допомогою повітря- і паропроникності, а також водотривкості будуть оцінені результати експериментів з необхідними показниками, які передбачені вихідними вимогами, проби спеціального матеріалу вивчаються на хімічну стійкість залежно від часу впливу, концентрації та природи агресивного середовища (сірчана, соляна, азотна, фосфорна кислоти, луги та аміак), а також розчинів солей на їх основі (рис. 1, поз. 3). Критеріями оцінки хемостойкості проб дослідних матеріалів можуть бути як класичні показники відповідно до стандартів [18, 20, 21], так і структурно-морфологічні зміни в процесі кислотного гідролізу (наприклад, зміна товщини, набухання, жорсткості, поява мікротріщин та ін.).

У разі отримання позитивних результатів по хімічній стійкості, проби матеріалів вивчаються на проникність краплі або певного обсягу агресивного середовища, яка повинна постійно витримуватися при заданій температурі і концентрації (рис. 1, поз. 4). Дифузійні процеси, що відбуваються з матеріалом і дифузанта, в нашому випадку необхідно контролювати тим часом, який має бути зафіксований в момент появи агресивного середовища або його слідів на зворотному боці досліджуваної проби, що, на відміну від стандартів [18, 19, 20], не суперечать роботам [8, 21, 22], які є фундаментальними в цій галузі науки.

Вивчивши таким чином захисні властивості існуючий асортимент спеціальних матеріалів, наступний етап роботи (рис. 1, поз. 5) полягає у проведенні художньо-конструкторських і технологічних досліджень, які пов'язані зі створенням моделі ізолюючого костюма, яка відповідає вимогам конкретного виробництва. Тому, основними критеріями оцінки при виконанні даного етапу, повинен бути аналіз умов праці апаратника з підготовки закритих ємностей до очищення і робітників-слосарів, що займаються цим процесом, а також вимогам замовника майбутнього ІК, з обов'язковим переліком засобів індивідуального захисту.

Що ж стосується останнього, шостого, етапу розробленої схеми (рис. 1, поз. 6), то після успішного

виконання попередніх завдань, виготовлення ІК як процес повинен підпорядковуватися інженерно-технологічним рішенням, пов'язаним з вибором способів і методів з'єднання деталей костюма, що в значній мірі впливає на захисні, фізико-механічні, експлуатаційні, фізіолого-гігієнічні властивості готового виробу і його надійність при експлуатації в конкретних ситуаціях.

Висновки

Запропонована функціонально-логічна схема сприяє обґрунтованому вибору та оцінці захисних властивостей спеціальних матеріалів для виготовлення ізолюючих костюмів вітчизняного хімічного виробництва. Дана розробка дозволяє спростити і оптимізувати процес проектування спецодягу для працівників різних підвидів хімічної промисловості.

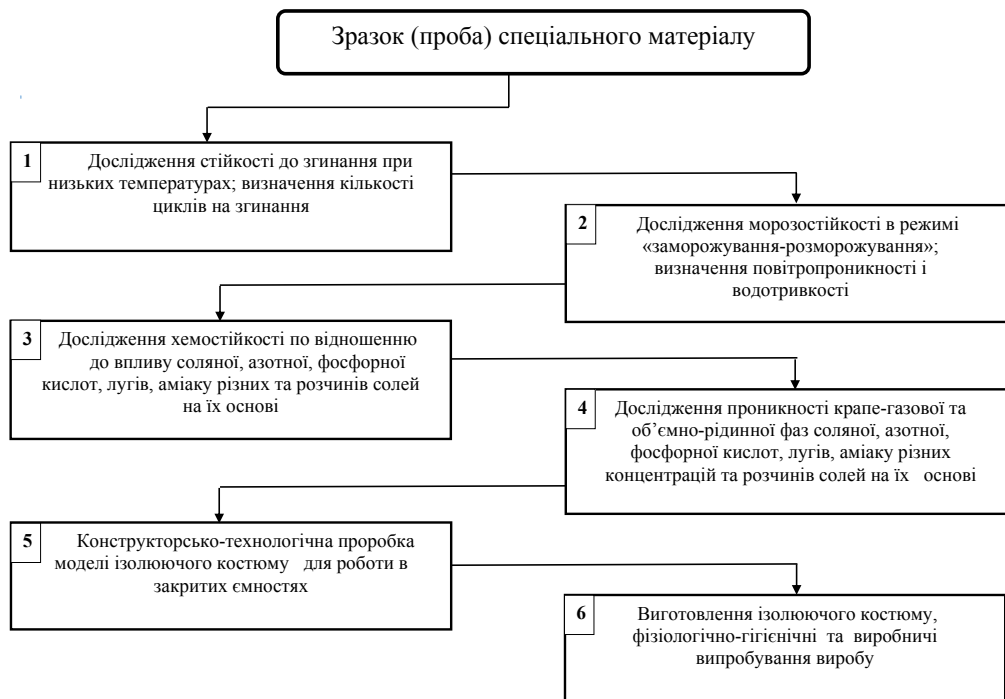


Рис. 1. Функціонально-логічна схема вибору і оцінки захисних властивостей спеціальних матеріалів для виготовлення ізолюючого костюму

Література

1. Изолирующий костюм Dräger CPS 5800 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://www.draeger.com/ru_ru/Applications/Products/Personal-Protection-Equipment/Protective-Clothing/Gas-Tight-Suits/CPS-5800.
2. Костюм защитный Л-1 новый [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://promsiz.com.ua/product/kostyum_l_1_noviy_mikrofiltr_.html.
3. Костюмы изолирующие в Украине [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://prom.ua/Kostyumu-izoliruyuschie.html>.
4. Костюм и изолирующий химический КИХ-4ЛН [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://xn-80aodaahri3e.xn-p1ai/catalog/sredstva-individualnoy-zaschityi/odejda-izoliruyushego-tipa-dlya-remontnyih-i-avariynyh-rabot/kostyum-izoliruyuschiy-himicheskiy-kih-4ln>
5. Галиева Э.Р. Анализ костюмов изолирующих химических как основной фактор разработки универсальной технологии изготовления специальной защитной одежды / Э.Р. Галиева, Г.Н. Нуруллина, М.А. Абзалтдинова // Вестник технологического университета. – Казань, 2016. – № 8. – С. 73–74.
6. Козырева Е. Б. Текстильно-резиновый материал для средств индивидуальной защиты, стойкий к воздействию агрессивных и химически опасных веществ : дис. ... канд. техн. наук : 05.19.01 / Козырева Е. Б. – Казань, 2007. – 124 с.
7. Иванов Ю.А. Хранение и транспортировка жидкого аммиака / Иванов Ю.А., Стрижевский И.И. – Москва : Химия, 1991. – 72 с.
8. Мычко А.А. Разработка методов оценки защитных свойств и выбора текстильных материалов для специальных изделий в экстремальных условиях : дис. ... докт. техн. наук : 05.19.01 / Мычко А.А. – С-Петербург, 1997. – 394 с.
9. Очкуренко В.И. Разработка методов оценки и исследование свойств материалов для верха кислотозащитной специальной обуви : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.19.01 / Очкуренко В.И. – С-Петербург, 1990. – 22 с.
10. Очкуренко В.И. Изучение влияния минеральных кислот и низких температур на некоторые механические свойства искусственных кож / В.И. Очкуренко, А.А. Мычко, К.Е. Перепёлкине // Известия Вузов. Технология швейной промышленности. – 1990. – № 2. – С. 72–76.

11. Моисеев Ю.В. Химическая стойкость полимеров в агрессивных средах / Моисеев Ю.В., Заиков Г.Е. – Москва : Химия, 1979. – 288 с.
12. Тагер А.А. Физико-химия полимеров / Тагер А.А. – Москва : Химия, 1968. – 536 с.
13. Воробьева Г.Я. Химическая стойкость полимерных материалов / Воробьева Г.Я. – Москва : Химия, 1981. – 296 с.
14. Зуев Ю.С. Разрушение полимеров под действием агрессивных сред / Зуев Ю.С. – Москва : Химия, 1972. – 230 с.
15. Действие активных жидких сред на химические волокна (высокопрочные) / Перепелкин К.Е., Зарин А.В., Андреев А.С., Звезгинцева А.А. – Москва : НИИТЭХИМ, 1982. – 80 с.
16. Шеромова И.А. Изучение влияния агрессивных факторов на защитные свойства спецтканей / И.А. Шеромова, В.В. Киселева, В.Е. Романов, А.А. Мычко // Известия Вузов. Технология легкой промышленности. – 1987. – № 5. – С. 27–30.
17. Кожа искусственная и синтетическая и пленочные материалы. Методы определения морозостойкости в статических условиях : ГОСТ 15162-82. – [Взамен ГОСТ 15162-69, ГОСТ 8974-78 ; введ. 01.07.83]. – М. : Изд-во стандартов, 1982. – 9 с.
18. Ткани полушерстяные для кислотозащитной спецодежды. Технические условия : ГОСТ 16166-80. – [Взамен ГОСТ 16166-70 ; введ. 01.01.82]. – М. : Изд-во стандартов, 1980. – 7 с.
19. Ткани хлопчатобумажные и смешанные для спецодежды : ГОСТ 11209-85. – [Взамен ГОСТ 11209-72 ; введ. 01.07.86]. – М. : Изд-во стандартов, 1985. – 13 с.
20. Ткани из химических волокон и их смесей с хлопком с кислотоотталкивающей пропиткой для спецодежды. Технические условия : ОСТ 17-345-85. – Введ. 01.01.85. – Калинин : ЦНИИШВ, 1984. – 6 с.
21. Материалы с полимерным покрытием для специальной одежды и средств защиты рук. Метод определения стойкости к действию кислот и щелочей : ГОСТ 12.4.146-84. ССБТ. – Введ. 01.01.86. – М. : Изд-во стандартов, 1985. – 4 с.
22. Мычко А.А. Исследование проницаемости спецтканей на основе лавсановых волокон и их хемостойкости к некоторым агрессивным жидкостям : дис. ... канд. техн. наук : 05.19.01 / Мычко А.А. – Киев, 1979. – 206 с.

References

1. Insulating suit Dräger CPS 5800 [Electronic resource]. – Access mode: https://www.draeger.com/ru_ru/Applications/Products/Personal-Protection-Equipment/Protective-Clothing/Gas-Tight-Suits/CPS-5800.
2. Protective suit L-1 new [Electronic resource]. – Access mode: https://promsiv.com.ua/product/kostyum_1_1_noviy_mikrofiltr_html.
3. Insulating suits in Ukraine [Electronic resource]. – Access mode: <https://prom.ua/Kostyumi-izoliruyuschie.html>.
4. Suit and chemical insulating KIH-4LN [Electronic resource]. – Access mode: <http://xn-80aodaahri3e.xn-p1ai/catalog/sredstva-individualnoy-zaschityi/odejda-izoliruyuschego-tipa-dlya-montnyih-i-avariynih-rabot/kostyum-izoliruyushiy-iharite>.
5. Galieva E.R. Analysis of insulating chemical suits as the main factor in the development of a universal technology for the manufacture of special protective clothing / Galieva E.R., Nurullina G.N., Abzaltdinova M.A. // Kazan, Bulletin of the Technological University. – 2016. – №8. – pp. 73–74.
6. Kozyreva E. B. Textile-rubber material for personal protective equipment, resistant to aggressive and chemically hazardous substances: dis. Cand. tech. Sciences: 05.19.01 / Kozyreva E. B. – Kazan, 2007. – 124 p.
7. Ivanov Yu.A. Storage and transportation of liquid ammonia / Ivanov Yu.A., Strizhevsky I.I. – Moscow: Chemistry, 1991. – 72 p.
8. Mychko A.A. Development of methods for assessing the protective properties and the choice of textile materials for special products in extreme conditions: dis. Dr. tech. Sciences: 05.19.01 / Mychko A.A. – St. Petersburg, 1997. – 394 p.
9. Ochurenko V.I. Development of methods for assessing and studying the properties of materials for the top of an acid protective special footwear: author. dis. on zdotyia sciences. stage Cand. tech. Sciences: spec. 05.19.01 / Ochurenko V.I. – St. Petersburg, 1990. – 22 p.
10. Ochurenko V.I. Studying the effect of mineral acids and low temperatures on some mechanical properties of artificial leather / Ochurenko V.I., Mychko A.A., Perepelkie K.E. // Izvestia Universities. Technology garment industry. – 1990. – №2. – pp. 72–76.
11. Moiseev Yu.V. Chemical resistance of polymers in aggressive media / Moiseev Yu.V., Zaikov G.E. – Moscow: Chemistry, 1979. – 288 p.
12. Tager A.A. Physics-chemistry of polymers / Tager A.A. – Moscow: Chemistry, 1968. – 536 p.
13. Vorobiova G.Ya. Chemical resistance of polymeric materials / Vorob'eva G.Ya. – Moscow: Chemistry, 1981. – 296 p.
14. Zuev Yu.S. Destruction of polymers under the influence of aggressive media / Zuev Yu.S. – Moscow: Chemistry, 1972. – 230 p. – (2).
15. Effect of active liquid media on chemical fibers (high-strength) / Perepelkin K.E., Zarin A.V., Andreev A.S., Zvezgintseva A.A. – Moscow: НИТЕХИМ, 1982. – 80 p.
16. The study of the influence of aggressive factors on the protective properties of special fabrics / Sheromova I.A., Kiseleva V.V., Romanov V.E., Mychko A.A. – News of the universities. Technology of light industry – 1987. – №5. – p. 27–30.
17. GOST 15162-82. Artificial and synthetic leather and film materials. Methods for determining frost resistance under static conditions. Instead, GOST 15162-69, GOST 8974-78; Enter 07/01/83. – M.: Publishing house of standards, 1982. – 9 p.
18. GOST 16166-80. Half-woolen fabrics for acid protective clothing. Technical conditions. – Instead of GOST 16166-70; Enter 01/01/82. – M.: Standards Publishing House, 1980. – 7 p.
19. GOST 11209-85. Cotton and mixed fabrics for workwear. – Instead of GOST 11209-72; Enter 07/01/86. – M.: Publishing house of standards, 1985. – 13 p.
20. OST 17-345-85. Fabrics made from chemical fibers and their mixtures with cotton with acid-repellent impregnation for workwear. Technical conditions. Enter 01/01/85. – Kalinin. TSNIISHV. 1984. – 6 p.
21. GOST 12.4.146-84. SSBT. Materials with polymer coating for special clothing and hand protection. Method for determination of resistance to acids and alkalis. Enter 01/01/86. – M.: Standards Publishing House, 1985. – 4 p.
22. Mychko A.A. Investigation of the permeability of special fabrics based on lavsan fibers and their chemical resistance to some aggressive fluids: dis. Cand. tech. Sciences: 05.19.01 / Mychko A.A. – Kiev, 1979. – 206 p.

Рецензія/Peer review : 10.3.2019 р.

Надрукована/Printed : 10.4.2019 р.

Рецензент: д. т. н., доц. Захаркевич О. В.

О. В. НАХАЙЧУК, Е. А. ЗАХАРОВА, А. А. МІЗРАХ, О. В. МАРЧУК
Вінницький інститут конструювання одягу і підприємництва

ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТКАНИН З ВИКОРИСТАННЯМ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Авторами статті розроблена методика дослідження міцності тканини з використанням математичного моделювання, яка дозволяє, без проведення трудомістких експериментальних досліджень, прогнозувати вичерпання характеристик міцності тканин на різних стадіях експлуатації із врахуванням одночасної дії різних виробничих факторів. Використане стереометричне моделювання показало, що втрата міцності може бути відображена шляхом деформування, який включає три характеристики, графік зміни яких побудований в безрозмірній тривимірній системі координат. Авторами обґрунтовано, що міцність виробів із тканини залежить не тільки від її фізико-механічних властивостей, а і від характеристик, яких набуває тканина в процесі використання – їх зміна може бути представлена в безрозмірній тривимірній системі координат шляхом деформування; показана можливість кількісної оцінки запасу міцності на різних стадіях експлуатації. Визначено вплив шляху деформування на міцність тканини із врахуванням накопичення пошкоджень на різних стадіях як виготовлення, так і експлуатації, що дає можливість оптимального вибору відповідних матеріалів та розробки рекомендацій до їх застосування. Дані результати автори рекомендують використовувати для створення тканин із прогнозованими властивостями, особливо це має значення для екстремальних умов їх експлуатації.

Ключові слова: математичне моделювання, міцність тканини, критерій руйнування, шлях деформування, використаний ресурс, цикл тертя.

O. V. NAKHAYCHUK, E. A. ZAKHAROVA, A. A. MIZRAH, O. V. MARCHUK
Vinnitsia Institute of designing of clothes and Entrepreneurship

RESEARCH OF PHYSICAL-MECHANICAL CHARACTERISTICS OF TISSUES WITH USING MATHEMATIC MODELLING

The authors of the article developed a method of studying the strength of tissue using mathematical modelling. Taking into account the simultaneous action of various production factors, it allows to predict the exhaustion of the characteristics of the strength of tissues at different stages of exploitation without carrying out labour-intensive experimental studies. It has been shown that the loss of strength can be represented by deformation, using stereometric simulation that includes three characteristics. Their change schedule is constructed in a dimensionless three-dimensional coordinate system. The authors substantiate that the strength of fabrics depends not only on its physical and mechanical properties, but also on the characteristics that the fabric acquires during its use. Their change can be represented in a dimensionless three-dimensional coordinate system by means of deformation; the possibility of quantification of the safety margin at different stages of operation is shown. Taking into account the accumulation of damage at different stages of manufacture and operation, the influence of the deformation pathway on the strength of the fabric is determined. It gives an opportunity to select optimally the relevant materials and develop recommendations for their application. These results are recommended by the authors for the creation of fabrics with predictive properties. It is important for the extreme conditions of their exploitation.

Key words: mathematical modelling, fabric strength, fracture criterion, deformation path, used resource, friction cycle.

Вступ

Зносостійкість та міцність текстильних матеріалів визначається їх здатністю тривалий період протистояти дії руйнуючих чинників, яким вони піддаються під час експлуатації, до яких можна віднести фізичні, механічні, біологічні та хімічні. Вказані чинники можуть впливати на тканини як окремо, так і одночасно у різних комбінаціях в залежності від умов експлуатації виробів.

Відомо, що в процесі експлуатації тканина набуває мікропошкоджень, які з часом зростають до критичної кількості і відбувається її руйнування. В зв'язку з цим розробка розрахунково-експериментальних методів досліджень виробів з використанням математичного моделювання має практичне значення і дозволяє, без проведення матеріалозатратних та трудомістких експериментальних досліджень, прогнозувати їх якість та характеристики міцності ще як на стадії проектування, так і після визначеного часу використання.

При проектуванні технологічних процесів, пов'язаних з пластичним деформуванням матеріалів, знайшли широке використання критерії деформуємості [1, 2, 3], які враховують вплив на міцність заготовок мікро та макропошкодження на різних стадіях їх формоутворення. Мірою накопичення мікропошкоджень прийнято рахувати використаний ресурс пластичності. Приймається положення, згідно якого в необробленому матеріалі мікропошкодження відсутні ($\psi=0$). В подальшому, виріб в процесі формування і експлуатації, накопичує пошкодження, і руйнування настає при $\psi=1$. Даний підхід може бути використаний для дослідження матеріалів швейних виробів різного призначення.

Експериментальна частина

Метою даної роботи є підвищення якості швейних виробів на основі вивчення результатів розрахунково-експериментальних досліджень з вичерпання їх міцності та зносостійкості на різних стадіях експлуатації. Для досягнення цієї мети була сформульована задача – розробити методику дослідження міцності тканини з використанням математичного моделювання, за допомогою якої можна прогнозувати

вичерпання стійкості та міцності із врахуванням одночасної дії виробничих факторів.

Розглянемо одночасний вплив на міцність тканини таких факторів, як жорсткість при згині матеріалів B_y , кількість циклів тертя N , розривне навантаження F . Введемо поняття використаного ресурсу міцності тканини – відношення вичерпаного ресурсу по якомусь із факторів до його граничного значення, тобто для нашого випадку:

$$\psi_1 = \frac{F_m}{F_{cp}}; \quad \psi_2 = \frac{N_m}{N_{cp}}; \quad \psi_3 = \frac{B_{ym}}{B_{ycp}}, \quad (1)$$

де F_m, N_m, B_{ym} – текучі значення відповідно розривного навантаження, циклів тертя, жорсткості в процесі експлуатації; F_{cp}, N_{cp}, B_{ycp} – їх граничні значення (за яких відбувається руйнування).

Під шляхом деформування будемо розуміти графік, який побудований за результатами експериментальних досліджень, що відображає втрату міцності по трьом перерахованим характеристикам на різних стадіях експлуатації тканини. Виходячи із викладеного, в тривимірній системі координат гранична поверхня буде мати форму куба з довжиною ребер, рівною 1.

Експериментальні дослідження зразків тканини «Ортон» виконувались при нормальних умовах, передбачених стандартом (ГОСТ 10681-75). Тканину досліджено на розривне навантаження, згідно з ГОСТ 17922-72 «Ткани штучные и изделия текстильные. Метод определения раздирающей нагрузки» на розривній машині РТ-250М. Для дослідних робіт було використано метод малих смужок, призначений для випробування на розривання зразків пробних смужок шириною 25 мм при затискній довжині 200 мм (ГОСТ 3812-72) [4]. Цей метод застосовують при випробуванні тканини і трикотажних полотен.

Важливе значення для одягу має жорсткість тканини. Жорсткість при згині матеріалів для одягу визначається методом консолі. Цей метод передбачає визначення жорсткості матеріалів під дією власної маси, без примусової деформації. За методом консолі визначення жорсткості виконували на приладі ПТ-2 (ГОСТ 10550-75) [4]. За кінцевий прогин зразка було прийнято середнє арифметичне результатів десяти вимірів з точністю до 0,1 мм.

Тертя є однією з основних причин зносу одягу, тому стійкість до тертя внесена для ряду матеріалів в номенклатурі стандартних показників. Оцінювати стійкість матеріалу до тертя можна на різних стадіях випробування [5]. Критерієм оцінки вибрано стирання до повного зносу (до діри) – число циклів приладу, яке характеризує витривалість матеріалу, або час випробування до руйнування зразка, яким визначається довговічність за методикою ЦНДШП. Для визначення стійкості тканини «Ортон» до тертя застосовано прилад марки ДІТ, який виконує тертя по площі [4]. Встановлено, що для тканини «Ортон» граничними значеннями є: $F_{cp} = 69,3$ дН, $N_{cp} = 3526$ циклів тертя, $B_{ycp} = 9753$ мкН×см². Результати експериментальних досліджень представлені в таблиці 1, за якими в системі Math Cad побудована в двох виглядах гранична поверхня та шлях деформування (рис. 1, червона лінія).

Таблиця 1

**Результати досліджень зразків тканини «Ортон»
на жорсткість при згині, цикли тертя, розривне навантаження**

Точки	$B_{ym}, \text{мкН} \times \text{см}^2$	N_m	$F_m, \text{дН}$	Ψ_1	Ψ_2	Ψ_3
0	0	0	0	0	0	0
1	1951	1587	22,2	0,2	0,45	0,32
2	3023	2292	29,8	0,31	0,65	0,43
3 прогнозовані дані	4681	3526	45,7	0,48	1	0,66

Як видно із рис. 1, графік залежності зміни значень Ψ_1, Ψ_2, Ψ_3 в безрозмірній системі координат має квазілінійний характер, тому нескладно, використавши метод екстраполяції, знайти точку перетину із граничною поверхнею (точка К, рис. 2). В такому випадку, узагальнений критерій руйнування Ψ може бути визначено як відношення довжини лінії шляху деформування до довжини лінії від початку координат до перетину із граничною поверхнею (при умові, якщо суттєво не зміняться параметри експлуатації тканини до її руйнування):

$$\Psi = \frac{D_1 P}{D_1 K}. \quad (2)$$

Використовуючи елементарні геометричні та тригонометричні співвідношення, знаходимо:

$$D_1 P = \sqrt{\Psi_1^2 + \Psi_2^2 + \Psi_3^2}, \quad (3)$$

де Ψ_1, Ψ_2, Ψ_3 – координати точки 2, (див. таблицю 1).

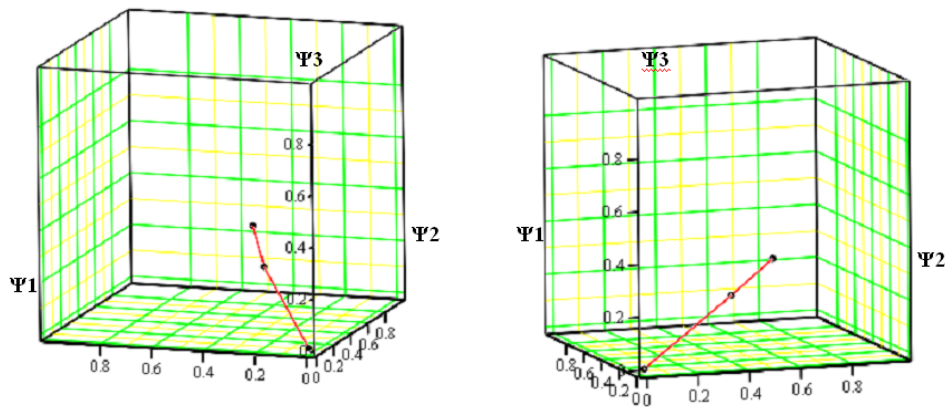


Рис. 1. Результати експериментальних досліджень в системі Math Cad (2 вигляди)

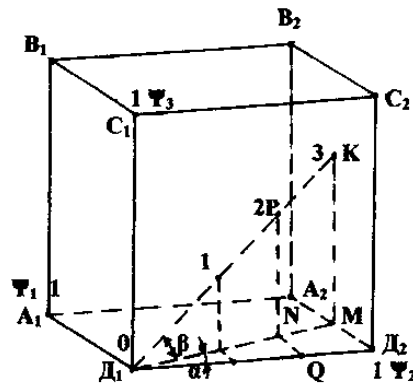


Рис. 2. Схема до визначення узагальненого критерію руйнування Ψ

Враховуючи, що кути α та β можна знайти як:

$$\alpha = \text{arctg} \frac{\Psi_1}{\Psi_2}, \quad \beta = \text{arctg} \frac{\Psi_3}{\sqrt{\Psi_1^2 + \Psi_2^2}}, \quad (4)$$

Довжина відрізка D_1M буде рівною: $D_1M = \frac{1}{\cos \alpha}$, оскільки точка K є прогнозованою точкою перетину шляху деформування площини $A_2B_2C_2D_2$. Тоді, в даному випадку, довжину D_1K можна знайти за формулою:

$$D_1K = \frac{D_1M}{\cos \beta} \quad (5)$$

Підставивши формули (3) та (5) в (2), знаходимо, що значення узагальненого критерію руйнування $\Psi = 0,65$, тобто дорівнює значенню Ψ_2 для точки 2 (див. таблицю 1). Такий же результат можна отримати, розглянувши подібність трикутників $KM D_1$, $PN D_1$ та $D_2M D_1$, $QN D_1$ (рис. 2).

Представлений приклад розрахунку можна вважати частковим випадком, оскільки шлях деформування інших тканин може мати форму кривих ліній з різними радіусами кривизни, які залежать від умов експлуатації (наприклад, на деякому етапі інтенсивність дії силових факторів значно перевищує результати впливу тертя та втрати жорсткості, або виникає переважна дія деформації розмірів в тому чи іншому напрямку). В таких випадках треба створювати математичні моделі з використанням методів апроксимації та екстраполювання [6].

Викладений загальний підхід може бути взятим за основу розрахунків міцності тканини з використанням стереометричного моделювання.

Висновки

Розроблена методика дослідження міцності тканини з використанням математичного моделювання, яка дозволяє, без проведення трудомістких експериментальних досліджень, прогнозувати вичерпання міцності на різних стадіях експлуатації із врахуванням одночасної дії різних виробничих факторів. Встановлено, що для тканини «Ортон» вичерпання міцності найбільш інтенсивно відбувається при дії такого фактора, як цикли тертя ($\Psi = \Psi_2 = 0,65$). Якщо за близькі до руйнування прийняти значення $\Psi_2 = 0,95 \dots 1$, то можна вважати, що міцність вичерпана приблизно на $2/3$. Отже, для запобігання руйнування необхідно зменшити або обмежити дію тертя.

Оптимальним шляхом деформування є лінія D_1B_2 , так як вона рівновіддалена від граней граничної поверхні. Для кожного випадку можуть бути знайдені прийнятні умови експлуатації тканини із врахуванням одночасної дії визначальних факторів.

Обґрунтовано, що міцність виробів із тканини залежить не тільки від її фізико-механічних властивостей, а і від характеристик, яких набуває тканина в процесі використання – їх зміна може бути

представлена в безрозмірній тривимірній системі координат шляхом деформування; показана можливість кількісної оцінки запасу міцності на різних стадіях експлуатації.

В подальшому, суттєвий науковий інтерес становитимуть дослідження з визначення впливу форми шляху деформування на міцність тканини із врахуванням лінійності або нелінійності накопичення пошкоджень на різних стадіях як виготовлення, так і експлуатації. Дані результати можуть бути використані для створення тканин із прогнозованими властивостями, – особливо це має значення для екстремальних умов їх експлуатації (дія шкідливих хімічних сполук, високих температур, великих значень розривних навантажень та ін.).

Література

1. Огородников В. А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением / Огородников В. А. – Киев : Вища шк., 1983. – 175 с.
2. Нові технологічні процеси з використанням прогресивних методів пластичного деформування : монографія / О. В. Нахайчук, О. О. Розенберг, В. А. Огородніков, А. Д. Крицький, В. В. Мельниченко, С. Ф. Студенець. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. – 158 с.
3. Нахайчук О. В. Оценка граничного формообразования заготовок при сложном нагружении / О. В. Нахайчук // Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія: Технічні науки. – 2012. – Випуск 10. – С. 23–26.
4. Бузов Б. А. Материаловедение швейного производства / Бузов Б. А. – М. : Легпромгостиздат, 1986. – 424 с.
5. Кукин Г. Н. Текстильное материаловедение / Г. Н. Кукин, О. Н. Соловйов, А. І. Кобляков. – М. : Легпромбытиздат, 1992. – 272 с.
6. Крилик Л. В. Обчислювальна математика. Інтерполяція та апроксимація табличних даних : навчальний посібник / Л. В. Крилик, І. В. Богач, М. О. Прокопова. – Вінниця : ВНТУ, 2013. – 111 с.

References

1. Ogorodnikov V. A. Ocenka deformiruemosti metallov pri obrabotke davleniem / Ogorodnikov V. A. – Kiev : Vishha shk., 1983. – 175 s.
2. Novi tekhnolohichni protsesy z vykorystanniam prohresyvykh metodiv plastychnoho deformuvannia : monohrafiia / O. V. Nakhaichuk, O. O. Rozenberh, V. A. Ohorodnikov, A. D. Krytskyi, V. V. Melnychenko, S. F. Studenets. – Vinnytsia : UNIVERSUM-Vinnytsia, 2008. – 158 s.
3. Nahajchuk O. V. Ocenka granichnogo formoobrazovaniia zagotovok pri slozhnom nagruzhennii / O. V. Nahajchuk // Zbirnik naukovih prac' Vinnic'kogo nacional'nogo agrarnogo universitetu. Serija: Tehnichni nauki. – 2012. – Vipusk 10. – S. 23–26.
4. Buzov B. A. Materialovedenie shvejnogo proizvodstva / Buzov B. A. – M. : Legpromgostizdat, 1986. – 424 s.
5. Kukin G. N. Tekstil'noe materialovedenie / G. N. Kukin, O. N. Solovjov, A. I. Kobljakov. – M. : Legprombytizdat, 1992. – 272 s.
6. Krylyk L. V. Obchysliuvalna matematyka. Interpoliatsiia ta aproksymatsiia tablychnykh danykh : navchalnyi posibnyk / L. V. Krylyk, I. V. Bohach, M. O. Prokopova. – Vinnytsia : VNTU, 2013. – 111 s.

Рецензія/Peer review : 21.3.2019 р.

Надрукована/Printed : 10.4.2019 р.

Рецензент: к. ф-м. н., доцент Шньорко В. М.

МЕТОДИ МОДЕЛЮВАННЯ ФОРМИ КОСТЮМА ЗА ПРИНЦИПОМ ХУСТКИ

В роботі наведено процес створення об'ємно-просторової форми дизайн-об'єктів, визначено методи моделювання форми костюма за принципом хустки та запропоновано систематизацію методів моделювання форми костюма з урахуванням сучасних модних тенденцій.

Ключові слова: методи моделювання, формотворення костюма, принцип хустки, дизайн-об'єкт, об'ємно-просторова форма.

A. NIKULINA

Ukrainian Engineering Pedagogic Academy

METHODS OF MODELLING THE FORM OF THE COSTUME BY THE PRINCIPLE OF THE SHAWL

The paper presents the process of creating the space-spatial form of design objects, determines the methods of modelling the shape of a suit according to the principle of a shawl, and proposes to systematize the methods of modelling the shape of a suit, taking into account modern fashion trends. The compositional-constructive analysis of images of clothes models and methods of the account of results at modelling of clothes are considered. It is established that the shape of a product depends on its cut, silhouette, volumetric shape, as well as on the properties of materials. The analysis carried out in the framework of the design activity showed that there are four ways of shaping the suit. The methods of modelling of the form are determined: modelling of a shape from a piece of material, modelling of the form on the basis of direct cut, modelling of the shape on the basis of curvilinear cut, modelling by means of sweep. The possibilities of modelling the shape of clothes from a whole piece of fabric on the basis of a scarf are studied. The first method of shaping a suit according to the principle of a scarf is described, which consists in the use of a scarf for its intended purpose. The second method of carrying out the principle of a scarf, consisting in the creation of parts of clothes from a scarf without disturbing the shape as a whole, was studied. The third method of shaping is considered, which allows to bring the scarf closer to the shape of the figure and to achieve the overall expressiveness of the suit. The fourth method - the method of art-figurative association, which is to enrich the impressions of the plastic properties of the handkerchief, its shaping and decorative possibilities and the process of displaying the characteristic features of these indicators in the creation of new forms of clothing, has been studied.

Key words: methods of modelling, shaping of a suit, principle of a scarf, a design-object, a three-dimensional form.

Постановка проблеми

Створення нових моделей одягу відбувається засобами проектної діяльності, спрямованої на створення дизайн-об'єктів з високим рівнем дизайнерських характеристик. Під час вирішення проектного завдання традиційними методами не завжди можливо отримати нові цікаві рішення, тому важлива активізація творчого пошуку в дизайн-проектванні, яка спрямована на розвиток творчого проектного мислення дизайнера і на інтенсифікацію самого процесу проектування. Освоєння, переосмислення традиційного дизайнерського спадку є одним з основних напрямків художньо-проектної практики на сучасному етапі. Актуальність даного напрямку визначається необхідністю пошуку альтернативних методів створення дизайн-об'єктів на основі традиційної формотворчої культури.

Проектування дизайн-об'єктів відповідно до наданого ескізу починається з аналізу способів та методів формотворення, завдяки яким можна отримати надану в ескізі об'ємно-просторову форму одягу. Моделювання форми костюма розглядається як процес втілення ідеї композиції у текстильному матеріалі, тому що саме він обумовлює форму костюма. Залежно від матеріалу визначається вибір способу утворення форми та методів для здійснення. Цей процес, по суті, взаємозалежний, тому що оболонка тіла задає форму костюма з конкретного по пластики матеріалу. Кожен із методів формотворення являє собою систему принципів і прийомів, в основі яких лежать визначальні чинники. По-перше, це ставлення дизайнера до текстильного матеріалу, тобто бачення, сприймання, відчуття його пластичних можливостей при утворенні форми. По-друге, відношення матеріалу до оболонки тіла, що розкриває здатність виявляти форми тіла з гармонійними пропорціями [4].

Проведений аналіз в рамках дизайн-діяльності показав, що існує чотири способи формотворення костюма, принципово різні між собою і в той же час органічно пов'язаних один з іншим специфікою роботи і конкретного пошукового розвитку форми. Визначають такі способи моделювання форми: моделювання форми від шматка матеріалу, моделювання форми на основі прямого крою, моделювання форми на основі криволінійного крою, моделювання за допомогою розгортки.

У запропонованій статті зроблена спроба дослідити можливості моделювання форми одягу від цілого шматка тканини за принципом хустки, що демонструє пошук не тільки пластично образних можливостей тканини, але і характер форми, її гармонійну цілісність.

Аналіз останніх джерел

Аналіз останніх досліджень і публікацій показав, що Г. С. Горіна, В. В. Єрмілова і Д. Ю. Єрмілова, А. Н. Кисельова та ін. у своїх наукових роботах прагнули до створення нового алгоритму створення костюмних форм. Об'єднуючи структурний (Ф. М. Пармон, О. Н. Данилова та ін.), системно-структурний (Т. В. Козлова) методи аналізу костюма, використовуючи концептуально-образний метод (Р. А. Степучев, Л. П. Ритвінська і ін.), з огляду на метод аналізу народного костюма (Ф. де Сосюра), в цілому, розроблена

методологія, заснована як на класичних, так і на узагальнених культурологічних підходах і прийомах аналізу костюмних форм. Також показано, що виснаження формотворчих і колірних інноваційних рішень визначає інтерес дизайнерів до пошуку інших джерел проектних постанов [3].

Отже, актуальність теми підтверджується необхідністю вирішення наукової проблеми пошуку нових методів формотворення, спрямованих на підвищення естетичних, ергономічних і економічних показників виробів модної індустрії.

Виклад основного матеріалу

Актуальність обраної тематики дослідження підтверджується тим, що принцип хустки – це принцип формотворення м'якої форми костюма. Він є частиною методу формотворення від шматка матеріалу. Особливість принципу хустки полягає в квадратній формі самого шматка матеріалу, який заснований на суворій симетрії статичного орнаменту. У межах заданого квадрата з використанням 1, 2, 4 і більше осей симетрії будуються всі композиційні схеми з однаковою побудовою рисунка на всіх чотирьох кутах. До класичних схем можна віднести композиції з одною діагональною віссю і одним акцентованим кутом.



Рис. 1. Композиція форми хустки як головного убору

Пізніше на зміну статичним прийшли більш динамічні композиції, що дали змогу хустки міцно зайняти місце в сучасному костюмі та виконувати також різну декоративну роль. Хустка поступово зумовлює утворення форми, що складається в принцип її моделювання. Моделювання форми за принципом хустки можна знайти у роботі багатьох дизайнерів, яке здійснюється з цілої хустки або з її фрагментів. При цьому зберігаються прямі лінії з'єднання її частин, що дає можливість отримувати форму, певну розміром хустки. А також забезпечуються гармонійність композиційно узгодженої моделі одягу, що виявляється у пропорціонуванні, масштабуванні, ритмічності та супідрядності об'ємно-просторової форми виробу та його частин. Разом з тим використовується пластичне рішення форми виробу, розміри елементів у виробі та співвідношення кольору та фактур [2].

Перш ніж розглянути можливості моделювання форми з хустки, простежимо її участь в організації костюма та об'ємно-просторову структуру. Наприклад, хустку як головний убір, будучи по-різному пов'язаний на голові, дає статичні, динамічні, симетричні і асиметричні конфігурації силуету вгорі (рис. 1). Якщо її форма кругла, квадратна, трикутна, трапецієподібна, то вона може бути і головною точкою композиції всього костюма. Так буває, коли форма хустки складністю і витонченістю драпіровок акцентує

увагу, змушуючи відносно простоту форм костюма підкорятися йому.

Інший випадок, коли хустка використовується як частина костюма, яка накидається або поверх легкого хустки на голову, або на плечі, надаючи монументальність силуету костюма (рис. 2). Це формотворення, що розглядає форми як частини костюма та додаток до його об'ємно-просторової структури. Такий хід дає можливість додаткового скульптурного ліплення силуетної форми костюма, що різноманітнить його не тільки тектонічно, а й в образному плані.

Образний зміст костюма буде нести різну емоційну інформацію в залежності від того, як буде пов'язана хустка. Таким чином виходить, що костюм може бути монументальний, динамічний, енергійний та ін., залежно від того, як укладені або довільно розкидані складки його кінців. Такий вид вживання хустки як штучного, композиційно закінченого виробу ми класифікуємо як перший метод формотворення костюма за принципом хустки, який полягає у використанні хустки за своїм прямим призначенням.

Другий метод здійснення принципу хустки полягає у створенні з хустки тих чи інших форм одягу, тобто частин костюма без порушення форми в цілому (рис. 3). При цьому частини хустки можуть так чи інакше скріплюватися застібками або з'єднувальними швами [1]. Наприклад, з одного, двох або більше хусток можна зробити спідницю прямої форми; з одного пледа можна зробити м'яке пальто, що підкреслює незвичайну



Рис. 2. Композиція форми хустки як частини костюма

форма з м'якою драпірованою спиною тощо.

Пластика хустки дає декілька варіантів формотворення костюма, що повідомляє силует, м'якість і динамічність форми або гостроту і монументальність. Різна маса хусток, різні кількості драпіровок дають свій ефект формоутворення, по різному будують загальний силует костюма.

Як бачимо, можна укладати і з'єднувати кілька хусток по-різному, отримуючи з них при цьому різні форми одягу. Це підтверджує, що принцип хустки показує ефект м'якої форми, яка дозволяє отримувати різний скульптурний силует і образну наповненість.

Асортиментна належність форми костюма може направити думку дизайнера на формотворення зі своїм тектонічним і емоційним відтінками. Також за принципом хустки може бути отримані форми суконь і ансамблів [1]. Наприклад, верхня частина сукні зроблена з однієї хустки, що перегнуто навпіл, спідниця виконана з чотирьох хустин з відігнутими краями; хустки розташовані по косій нитці утоку і з'єднані між собою по краях, спідниця зібрана в збірку і з'єднана з ліфом тощо.

Так само сукня може ґрунтуватися з двох хусток, що з'єднані між собою по вертикалі спереду і ззаду або по боковим швам. Їх частини утворюють горловину, бретелі або рукава і пройму. В результаті отримуємо монументальні фалди внизу або орнаментальний рисунок, які надають урочистий характер дизайн-об'єкту (рис. 4).

Модифікацію цих форм можна продовжити, якщо шукати формотворення за принципом хустки з косим напрямком ниток, міняти місцями прямий і косий напрямок ниток застосовуючи комбінаторику первинних утворень.



Рис. 3. Композиція форми хустки без порушення конфігурації в цілому

Третім методом формотворення за принципом хустки слід вважати моделювання із застосуванням крою. Метод дозволяє наблизити хустку, яка утворює форму одягу до форми фігури і одночасно зберегти її пластику, декоративність малюнка, тим самим і досягти загальної виразності костюма. Можна сказати, що саме пластика форми за принципом хустки диктує лінії крою та ступінь прилягання одягу до фігури. При створенні дизайн-об'єктів потрібно вирішити проблеми, пов'язані з відсутністю однозначно визначеної просторової форми одягу і складністю урахування властивостей матеріалів при утворенні цієї форми. Параметри об'ємно-просторової форми виробу обумовлені величинами розмірних ознак фігури людини і прибавок.

Також можна передбачити драпірувальність, жорсткість, гнучкість, як основні властивості матеріалу хустки, які задають можливість створювати задану форму костюма. Для створення зорових ілюзій об'ємності і руху форми використовуються світло-тіньові ефекти матеріалів і такі властивості, як колір, фактура, блиск, прозорість тощо.

Найчастіше лінії крою при проектуванні дизайн-об'єктів за принципом хустки дають вільну, досить об'ємну форму (зустрічається суцільно кроєний рукав, крій реглан, комбінований тощо). Однією з особливостей даного методу формотворення є те, що отримані при крої залишки хустки повинні бути не тільки мінімальними, але і використовуватися у формотворенні костюма [1].

Зокрема, блуза з суцільно кроєним рукавом, виконана з хустки, перегнутої навпіл так, що посередині переду, спинки і по рукавах нитка розташовується по відношенню до осевих ліній під кутом 45°. Пом'якшена плавна лінія рукава утворює простору форму рукава. Виточки відсутні, так як тканина розташована по косій нитці, та буде добре, без змін проходити по фігурі. Виріз горловини овальний, що підкреслюється спокійною кривизною. Досягнуто і найбільш виразне розташування рисунка, декоративність його звучання (рис. 5).



Рис. 4. Композиція форми сукні за принципом хустки



Рис. 5. Композиція форми сукні за принципом хустки із застосуванням крою

Четвертим методом моделювання за принципом хустки є метод художньо-образної асоціації. Він полягає в тому, що дизайнер, збагачуючи свої враження від пластичних властивостей хустки, її формотворних і декоративних можливостей, відображає характерні риси цих показників у створенні нових форм одягу. Такі форми утворюються на основі відомих форм крою сучасного одягу. Як правило, форма одягу з адресуванням до хустки будується комбінованими прийомами [1].

Наприклад, пряме пальто в плечовому поясі може мати м'яке формотворення коміра, рукавів, капюшона та нагадують хустку. Вся форма пальто з вшивним рукавом символізує важку об'ємну шаль. Фрагменти драпіровок при зав'язуванні або накиданні хустки лягли в основу формотворення драпірованої форми сукні. Взявши від хустки м'яке драпірування, дизайнер модифікував форму, надавши їй овальні обриси, що знаходяться в гармонії з овальними лініями



Рис. 6. Композиція форми сукні методом художньо-образної асоціації

силуету сукні (рис. 6).

Висновки

Визначено, що у роботах багатьох дизайнерів, які спираються на текстильний матеріал та його властивості для проектування об'ємно-просторових форм одягу різної складності у повному обсязі використовується принцип хустки, причому застосовуючи цілу хустку або її фрагменти.

Дана класифікація методів моделювання забезпечує єдність форми і художнього задуму, гармонію конструктивного рішення і характеру поверхні текстильного матеріалу. Проаналізовано зв'язок властивостей текстильного матеріалу з методами формотворення складних об'ємно-просторових форм за принципом хустки. На основі проведеного аналізу розроблені приклади дизайн-об'єктів по оптимальному співвідношенню характеристик форми одягу та методів формотворення.

Література

1. Горіна Г. С. Моделювання форми одягу / Г. С. Горіна. – М. : Легка і харчова промисловість, 1982. – 184 с.
2. Лагунова А. В. Композиционное решение в дизайне текстильных изделий [Електронний ресурс] / Режим доступу : <http://www.visnik.org/pdf/v2011-03-09-lagunova.pdf>
3. Ніколаєва Т. В. Основи теорії формоутворення костюма : навч. посіб. / Т. В. Ніколаєва, Н. В. Чупріна. – К. : КНУТД, 2004. – 156 с.
4. Пашкевич К. Л. Проектування тектонічних форм одягу з урахуванням властивостей тканини : монографія / К. Л. Пашкевич. – К. : ПП «НВЦ «Профі», 2015. – 364 с.

References

1. Horina H. S. Modeliuvannia formy odiahu / H. S. Horina. – M. : Lehka i kharchova promyslovist, 1982. – 184 s.
2. Lagunova A. V. Kompozitsionnoe reshenie v dizajne tekstil'nyh izdelij [Elektronnij resurs] / Rezhim dostupu : <http://www.visnik.org/pdf/v2011-03-09-lagunova.pdf>
3. Nikolaieva T. V. Osnovy teorii formoutvorennia kostiuma : navch. posib. / T. V. Nikolaieva, N. V. Chuprina. – K. : KNUTD, 2004. – 156 s.
4. Pashkevych K. L. Proektuvannia tektonichnykh form odiahu z urakhuvanniam vlastyvostei tkanyny : monohrafiia / K. L. Pashkevych. – K. : PP «NVTs «Profі», 2015. – 364 s.

Рецензія/Peer review : 23.2.2019 р.

Надрукована/Printed : 10.4.2019 р.
Рецензент: к. п. н., доц. Попова Т. І.

О. П. КИЗИМЧУК, Л. М. МЕЛЬНИК, О. А. БОГУНОВА

Київський національний університет технологій та дизайну

ДОСЛІДЖЕННЯ ТИСКУ ЕЛАСТИЧНОГО ОСНОВОВ'ЯЗАНОГО ТРИКОТАЖУ

Мета роботи полягає у дослідженні тиску, який створює еластичний основов'язаний трикотаж на тіло людини та встановлення його залежності від параметрів в'язання та умов експлуатації виробу. В результаті реалізації двофакторного експерименту виявлено, що найбільший вплив на параметри структури має лінійна густина поперечної утокової нитки, а показник тиску полотна на тіло людини залежить від попереднього видовження еластомерної нитки, а також від видовження полотна та діаметру кривизни поверхні охоплення. Отримані в результаті дослідження рівняння регресії, які адекватно описують залежність параметрів структури полотна від кількості ниток у поперечному утоку та попереднього видовження еластомерної нитки, дозволяють на етапі проектування полотна прогнозувати їхні властивості з урахуванням рівня тиску, який буде створювати трикотаж на тіло при різних умовах експлуатації виробу.

Ключові слова: еластичне полотно, основов'язання, утокове переплетення, параметри структури, тиск на тіло, подовження.

O. P. KYZYMCHUK, L. M. MELNYK, O. A. BOGUNOVA

Kyiv National University of Technologies and Design

INVESTIGATION OF PRESSURE OF ELASTIC WARP KNITTED FABRIC

The purpose of the work is to study the pressure of an elastic warp knitted fabric on the human body and to establish its dependence on the knitting parameters and the conditions of the product operation. An elastic warp knitted fabric is the subject of the study. The 15 gauge crochet knitting machine was used for its production. The 16.7 tex polyester yarn are used for ground interlooping "chain". The polyurethane thread of 0,8 mm diameter is laid longwise in each wale. The 33.4 tex polyester thread by 2, 3 or 4 ends are used as weft filling-in yarn to ensure the covering of polyurethane. The study of structural parameters of the elastic warp knitted fabric was conducted by standard methods according to the current scientific and technical documentation. MST pressure measuring device by SWISSLASTIC AG is used for the investigation of product pressure on the human body respectively to RAL-GZ 387/1. The experimental data was processing by mathematical statistics methods. The two-factor experiment has been planned and carried-out during this study. The linear density of the weft filling-in thread and the pre-elongation of warp filling-in elastomeric threads were chosen as input factors. As a result of the experiment, it was found that the linear density of the weft filling-in thread has the greatest influence on the structural parameters and pre-elongation of warp filling-in elastomeric threads has an influence on the value of the fabric pressure on the human body. Additional two-factor experiment has been planned and carried-out to study dependences the fabric pressure on both: the fabric extension and the curvature diameter of the coverage surface. The regression equations that adequately describe the dependences of the structural parameters on the number of threads in the weft filling-in yarn and on the pre-elongation of the elastomeric thread have been established during the study. They allow to predict fabric properties at the design stage, taking into account the pressure level on the body and different conditions of the product operating.

Keywords: elastic fabric, warp knitting, filling-in structure, structural parameters, pressure garment, elongation.

Сучасний підхід до проектування систем «фігура – компресійний одяг» з використанням тривимірних технологій включає моделювання обох елементів і розрахунок розгортки одягу. Зміна морфології і пластики тіла під впливом компресійного одягу залежатиме, перш за все, від тиску, який він спричиняє. В усіх випадках під впливом тиску буде відбуватися здавлювання і переміщення м'яких тканин (так званий ефект «пуш-ап»), зменшення охоплюваних розмірних ознак, а досягнення бажаного ефекту від компресійного одягу залежатиме від характеристик матеріалу, який використовують. Під час його вибору потрібно враховувати здатність створювати компресійний тиск, відповідність діапазонів допустимого здавлювання і зміщення підшкірної жирової і, можливо, м'язової тканин. Таким чином, необхідний результат компресійного впливу є наслідком правильного вибору матеріалу залежно від призначення одягу, величини тиску, який вона чинить на тіло, та ефекту корекції.

Компресійний одяг з розтяжних матеріалів знаходить застосування в медицині для корекції пластики фігур, регуляції венозного кровотоку і поліпшення якості життя після операцій (тиск одягу – 1,3–8,0 кПа [1, 2]), в спорті – для створення умов, що дозволяють поліпшити спортивні результати (тиск одягу – 0,65–2,4 кПа [3]). Корекційну білизну застосовують для утягування підшкірної жирової тканини і перерозподілу обсягу грудних залоз, талії і стегон (тиск одягу – 0,65–4,0 кПа [4]). Спортивний компресійний одяг призначений для впливу на м'язові тканини і може бути комбінованим (повноростовий з рукавами або без них, до рівня щиколоток, до рівня колін, до верхньої частини стегна або у вигляді закритого купальника); роздільним (легінси, шорти, плавки, джемпер, T-shirt, укорочений облягаючий ліф). У повсякденному одязі для забезпечення вимог комфорту та гігієни застосовують тиск 0,4–1,3 кПа [5]. Таким чином, діапазон значень тиску для компресійних виробів становить 0,4–8,0 кПа. Вплив менше 0,4 кПа вважається малим і не вважається компресійним.

За існуючою класифікацією матеріали поділяють на групи розтяжності, вимірюваної при навантаженні 60 Н / м: до першої групи відносять матеріали, відносно подовження яких менше 40 %, другої – 40–100 %, третьої – понад 100 %. Така класифікація заснована тільки на одному показнику і не може бути використана для прогнозування компресійних властивостей, оскільки більшість матеріалів, вплив яких можна розглядати як компресійний, потрапляють в першу групу розтяжності [6]. В той же час розтяжність

еластичного основов'язаного полотна, що використовують для виготовлення лікувально-профілактичних виробів, регламентована нормативною документацією [7] і повинна бути не менше 80 %. Дослідження показників розтяжності еластичного основов'язаного трикотажу утокового переплетення на базі переплетення ланцюжок показали [8], що показник змінюється в широких межах від 100 до 135 %, тобто такі полотна можна віднести до третьої групи розтяжності.

Метою роботи є дослідження тиску, який створює еластичний основов'язаний трикотаж на тіло людини та встановлення його залежності від параметрів в'язання (лінійної густини поперечного утоку та попереднього видовження еластомерної нитки) та умов експлуатації виробу (видовження полотна та кривизна поверхні, яку він охоплює).

Предметом дослідження є еластичний основов'язаний трикотаж утокового переплетення, виготовлений на машині 15 класу. Переплетенням ґрунту є ланцюжок, для якого використано поліефірну нитку лінійною густиною 16,7 текс. Поліуретанова нитка діаметром 0,8 мм прокладається у вигляді повздовжнього утоку в кожному петельному стовпчику. Для забезпечення поєднання ланцюжків в полотно та перекривання поліуретанової нитки застосовують поперечні утокові нитки, які прокладають з обох боків на всю ширину полотна. Як утокову використано поліефірну нитку 33,4 текс в декілька кінців.

Для визначення впливу параметрів в'язання на параметри структури та властивості трикотажу було сплановано двофакторний експеримент за планом Коно-2, де в якості керованих незалежних факторів обрано попереднє видовження (ϵ) еластомерної нитки перед зоною в'язання (210, 240 та 270 %) та кількість (k) кінців (2, 3 та 4) поліефірної нитки 33,4 текс поперечного утоку.

Методика. Дослідження параметрів структури еластичного основов'язаного полотна проводили стандартними методами відповідно діючій науково-технічній документації [9, 10, 11]. Дослідження тиску виробу на тіло людини проводили на апараті вимірювання тиску MST швейцарської фірми «SWISSLASTIC AG» відповідно RAL-GZ 387/1 [12]. Обробка експериментальних даних проводилась за допомогою методів математичної статистики.

Результати досліджень. В результаті реалізації спланованого експерименту в умовах ТОВ ТД Алком було вироблено 9 варіантів еластичного трикотажу та стандартними методами досліджено їхні основні характеристики. Для кожного з варіантів еластичного основов'язаного полотна проведено по 10 паралельних дослідів параметрів структури (щільності полотна по горизонталі та вертикалі, товщини та поверхневої густини), середні значення яких наведено у таблиці 1. Очевидно, що в результаті отримані полотна широкого діапазону поверхневих густин від 810 г/м² до 980 г/м², при цьому усі вони задовольняють вимоги нормативної документації стосовно поверхневої густини [12].

Таблиця 1

Параметри структури еластичного трикотажу

№	ϵ , %	k	Щільність в'язання		Товщина, T , мм	Поверхнева густина, m_s , г/м ²
			N_{cm}	N_p		
1	270	2	64	105	1.45	817.9
2	270	3	62	96	1.54	894.6
3	270	4	62	91	1.66	957.5
4	240	2	64	101	1.43	809.1
5	240	3	64	96	1.54	883.2
6	240	4	63	90	1.64	979.7
7	210	2	64	102	1.46	810.9
8	210	3	63	96	1.56	906.2
9	210	4	64	90	1.68	973.5

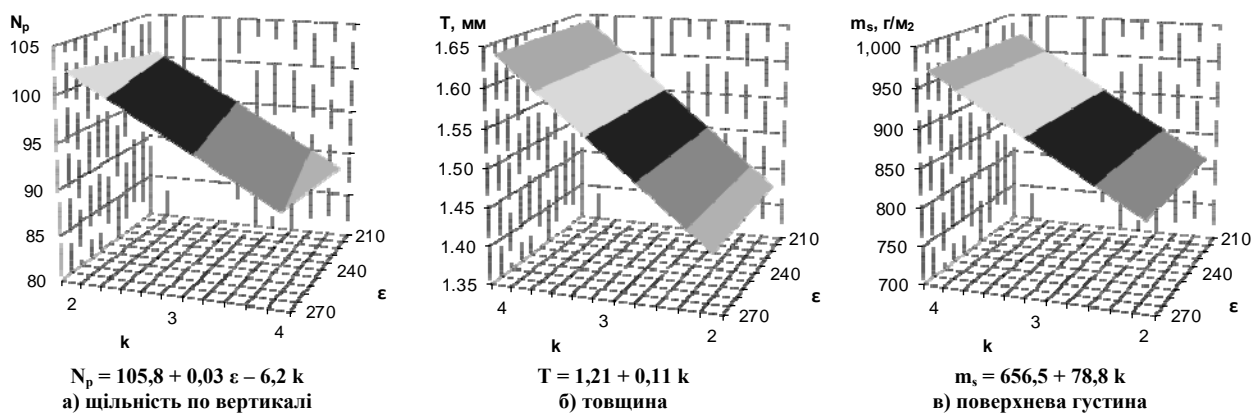


Рис. 1. Залежності параметрів структури трикотажу від параметрів в'язання

В результаті математичної обробки експериментальних даних отримано рівняння регресії першого порядку, які з вірогідністю 0,95 адекватно описують залежності певних параметрів структури від обраних

вхідних факторів, графічні відображення яких представлено на рис. 1.

Результати дослідження параметрів структури основ'язаного еластичного трикотажу утокового переплетення показали наступне:

- найбільший вплив на параметри структури має лінійна густина поперечної утокової нитки;
- попереднє видовження еластомерної нитки перед входом до зони в'язання незначно впливає лише на кількість петельних рядів у 100 мм, тобто на щільність полотна по вертикалі;
- жоден з факторів не впливає на кількість петельних стовпчиків у 100 мм, тобто на щільність полотна по горизонталі;
- товщина та поверхнева густина полотна залежить лише від лінійної густини поперечної утокової нитки.

Наведені висновки повністю підтверджують результати попередньо проведених досліджень [13].

Для проведення дослідження тиску, який створює досліджуваний трикотаж на тіло людини, використано апарат вимірювання тиску MST (рис. 2) швейцарської фірми «SWISSLASTIC AG» [14]. Процес вимірювання тиску полягає в наступному: вимірювальний зонд прикріплюється до дерев'яної ніжки, на яку одягається панчоха або зразок еластичного трикотажу і апарат вимірює тиск у кожній точці зонду. Плоский вимірювальний зонд не випирає, тому матеріал не перенапружений перед виміром, що попереджає виникнення недостовірних результатів. Результати вимірювання можна зчитувати безпосередньо з екрану, тобто їх не потрібно перетворювати за допомогою таблиць та формул. Одночасно можна контролювати спадання тиску.



Рис. 2. Вимірювання тиску на MST MK III

Дослідження, які проводяться останніми роками з визначення, прогнозування та моделювання тиску, яке створює одяг, зокрема компресійний, на тіло людини показує, що основними важелями, які впливають на результати дослідження поряд з методом проведення досліджень [15, 16] є ступінь подовження трикотажу на тій чи іншій ділянці, що звичайно пов'язане з величиною сили, прикладеної до зразка [17], та радіус кривизни поверхні, з якою контактує трикотаж [18].

Отже, для проведення досліджень було сплановано додатковий асортимент, в якому на додаток до основних факторів обрано два додаткових керованих незалежних фактори:

X_3 – периметр дерев'яної заготовки (p), де відбувається вимірювання, обрано на 2 рівнях: 370 мм та 595 мм;

X_4 – ступінь видовження зразка (Δ) під час одягання на заготовку, який обрано на 4 рівнях: 10, 20, 30 та 40 %.

Другий фактор варіювали зміною периметра зразка, який одягали на заготовку. Розміри зразків для відповідних рівнів видовження наведено в таблиці 2. Для кожного варіанту зразка проведено по 3 паралельні дослідження, середні результати яких представлено в таблиці 3.

Таблиця 2

Розміри експериментальних зразків полотна, мм

Плановане подовження, %	Периметр дерев'яної заготовки, мм	
	370	595
10	336	541
20	308	496
30	285	458
40	264	425

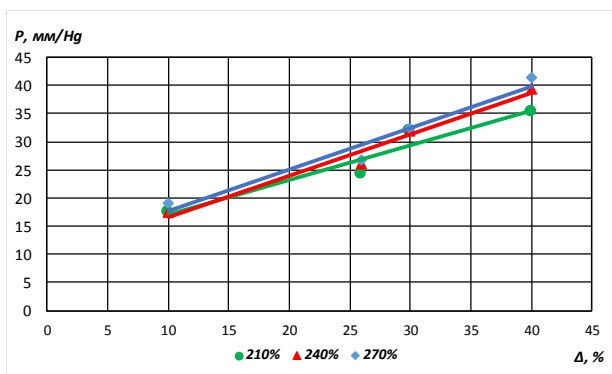
Отримані результати досліджень показують, що лінійна густина нитки, яку використовують в якості поперечного утоку, не впливає на рівень тиску, який створює трикотаж на тіло. Для визначення впливу на

досліджуваний показник іншого фактору – попереднього видовження еластомерної нитки – побудовано графіки, які представлено на рис. 3.

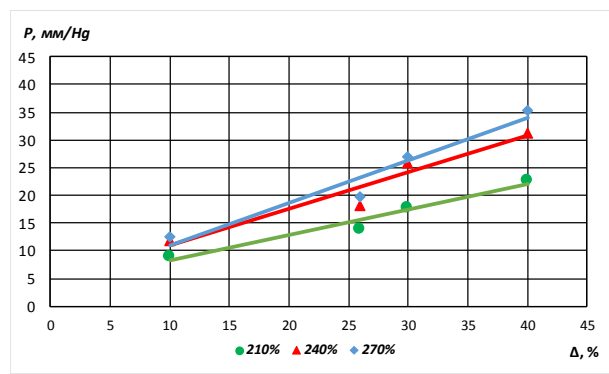
Таблиця 3

Тиск еластичного основ’язаного трикотажу

Попереднє видовження еластомерної нитки	Кількість ниток у поперечному утоці	Значення тиску при різному подовженні зразка, мм/Нг							
		периметр заготовки 370 мм				периметр заготовки 595 мм			
		10 %	20 %	30 %	40 %	10 %	20 %	30 %	40 %
$\epsilon=210\%$	$k=2$	16,0	23,5	31,0	31,5	9,0	13,5	17,5	23,0
	$k=3$	16,0	24,0	32,5	37,5	9,0	12,5	17,0	23,0
	$k=4$	20,0	25,0	32,5	35,0	9,0	15,5	19,0	22,5
$\epsilon=240\%$	$k=2$	14,5	24,0	29,5	39,5	11,5	20,0	26,5	33,0
	$k=3$	18,5	24,5	31,5	38,0	12,5	17,5	25,0	29,5
	$k=4$	19,5	29,5	35,0	40,5	12,0	17,0	26,0	31,5
$\epsilon=240\%$	$k=2$	20,0	25,0	33,0	40,5	11,5	22,0	27,0	36,5
	$k=3$	19,0	26,5	31,0	42,5	12,5	18,5	28,0	37,5
	$k=4$	18,0	28,5	33,0	41,5	13,5	19,0	26,0	32,0



а) периметр заготовки 370 мм



б) периметр заготовки 595 мм

Рис. 3. Залежність тиску від подовження зразка при різних периметрах заготовки

Очевидно, що попереднє видовження еластомерної нитки має вплив на показник тиску трикотажу: зростання вхідного фактору з 210 % до 270 % призводить до збільшення тиску трикотажу на тіло людини. Однак ступінь зміни показника залежить від умов експерименту: ступеня видовження полотна та периметру заготовки.

Так, при видовженні 10 % тиск змінюється незначно, а при видовженні 40 % спостерігаємо зростання показника, при чому різниця зростає при зменшенні периметру заготовки. Очевидно, що при периметрі заготовки 370 мм, зростання подовження трикотажу з 10 % до 40 % призводить до зростання тиску трикотажу більше ніж удвічі. При цьому вплив показника попереднє видовження еластомерної нитки незначний і має сенс лише при видовженні 40 %.

При збільшенні периметру заготовки до 595 мм тиск трикотажу на тіло людини зменшується на 30–50 %. При цьому зростання подовження трикотажу з 10 % до 40 % призводить до зростання тиску трикотажу на тіло людини удвічі при попередньому видовженні еластомерної нитки 210 % та майже втричі при попередньому видовженні еластомерної нитки 270 %. Отже вплив показника попереднє видовження еластомерної нитки в даному випадку істотніше.

Висновки та рекомендації. Проведені експериментальні дослідження параметрів структури (щільності полотна по горизонталі та вертикалі, товщини та поверхневої густини) основ’язаного еластичного трикотажу для лікувально-профілактичних виробів показали, що найбільший вплив на параметри структури має лінійна густина поперечної утокової нитки, а попереднє видовження еластомерної нитки перед входом до зони в’язання незначно впливає лише на кількість петельних рядів у 100 мм.

В результаті проведених досліджень показника тиску трикотажу на тіло людини встановлено наступне:

- лінійна густина нитки, яку використовують в якості поперечного утоку основ’язаного еластичного трикотажу не впливає на рівень тиску, який створює трикотаж на тіло;
- попереднє видовження еластомерної нитки впливає на ступінь тиску лише у випадку більшого периметру заготовки;
- периметр заготовки впливає на тиск, який створює трикотаж у зворотній залежності: його зростання призводить до зменшення тиску;
- ступінь видовження зразка при одяганні на заготовку прямопропорційно впливає на ступінь тиску трикотажу.

Література

1. Macintyre, L. Pressure garments for use in the treatment of hypertrophic scars – a review of the problems associated with their use / L. Macintyre, M. Baird // *Burns*, 2006. – 32. – P. 10–15.
2. Macintyre, L. New design tool for delivering graduated compression. // NED University of Engineering and Technology's International Textile Conference in Karachi, Pakistan, 2014.
3. Troynikova, O. 3D body scanning method for close-fitting garments in sport and medical applications / O. Troynikova, E. Ashayeri // HFESA 47th Annual Conference, 2011.
4. Lawrence, D. Graduated, static, external compression of the lower limb: a physiological assessment / D. Lawrence, V. V. Kakkar // *Br. J. Surg.* – Vol. 67 (1980). – P. 119–121.
5. Болдовкина О. С. Конструирование одежды : учебное пособие / О.С. Болдовкина. – Владивосток : ВГУЭС, 2005. – 27 с.
6. Го М. Влияние объемных конструктивных прибавок на комфортность женских платьев / М. Го, В. Е. Кузьмичев // *Швейная промышленность*. – 2014. – № 1. – С. 28–32.
7. ГОСТ 31509 – 2012. Изделия медицинские эластичные фиксирующие и компрессионные. Общих технические требования. Методы испытаний. – М. : Издательство стандартов, 2013. – 28 с.
8. Kyzymchuk, Olena. Stretch properties of elastic knitted fabric with pillar stitch / Olena Kyzymchuk, Liudmyla Melnyk // *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*. – 2018. – Vol. 13, No. 4, October-December. – P. 1–10. DOI: 10.1177/1558925018820722
9. ГОСТ 16218.4-93. Изделия текстильно-галантерейные. Метод определения плотности. – М. : Изд-во стандартов, 1995.
10. ГОСТ 12023-2003. Материалы текстильные. Полотна. Методы определения толщины. – М. : Изд-во стандартов, 1989.
11. ГОСТ 8845-87. Полотна и изделия трикотажные. Методы определения влажности, массы и поверхностной плотности. – М. : Изд-во стандартов, 2002.
12. Quality Assurance RAL-GZ 387/1. Medical Compression Hosiery.
13. Kyzymchuk O. Influence of technological parameters on the basis weight of elasticized fabric / O. Kyzymchuk, L. Melnyk, V. Liakhova, I. Hubar // *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія Технічні науки*. – 2017. – № 3 (110). – С. 83–90.
14. Офіційний портал фірми SWISSLASTIC AG [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.swisslastic.ch/en/products/pressure-measuring-devices-16>.
15. Kwon, Cassandra. An indirect testing approach for characterizing pressure profiles of compression bandages and hosiery / Cassandra Kwon, Meghan Hegarty, William Oxenham, Kristin Thoney-Barletta, Edward Grant & Lawrence Reid // *The Journal of The Textile Institute*. – 2018. – Vol. 109:2. – P. 256–267. DOI: 10.1080/00405000.2017.1340079
16. Kwon, Cassandra. An introduction to a new direct testing method for characterizing pressure in compression fabrics / Cassandra Kwon, Meghan Hegarty, William Oxenham, Kristin Thoney-Barletta, Edward Grant & Lawrence Reid // *The Journal of The Textile Institute*. – 2018. – Published online : 19 Nov 2018. DOI: 10.1080/00405000.2018.1527966
17. Chattopadhyay, R. Effect of input tension of inlay yarn on the characteristics of knitted circular stretch fabrics and pressure generation, / R. Chattopadhyay, D. Gupta & M. Bera // *The Journal of The Textile Institute*. – 2012. – Vol. 103:6. – P. 636–642, DOI: 10.1080/00405000.2012.665237
18. Jariyapunya, Nareerut. Predictive modelling of compression garments for elastic fabric and the effects of pressure sensor thickness, / Nareerut Jariyapunya & Blažena Musilová // *The Journal of The Textile Institute*. – 2018. – Published online : 19 Nov 2018. DOI: 10.1080/00405000.2018.1540285

References

1. Macintyre, L. Pressure garments for use in the treatment of hypertrophic scars – a review of the problems associated with their use / L. Macintyre, M. Baird // *Burns*, 2006. – 32. – P. 10–15.
2. Macintyre, L. New design tool for delivering graduated compression. // NED University of Engineering and Technology's International Textile Conference in Karachi, Pakistan, 2014.
3. Troynikova, O. 3D body scanning method for close-fitting garments in sport and medical applications / O. Troynikova, E. Ashayeri // HFESA 47th Annual Conference, 2011.
4. Lawrence, D. Graduated, static, external compression of the lower limb: a physiological assessment / D. Lawrence, V. V. Kakkar // *Br. J. Surg.* – Vol. 67 (1980). – P. 119–121.
5. Boldovkina O. S. Konstruirovaniye odezhdyy : uchebnoye posobie / O.S. Boldovkina. – Vladivostok : VGUEs, 2005. – 27 s.
6. Go M. Vliyaniye ob'emnykh konstruktivnykh pribavok na komfortnost' zhenskikh plat'ev / M. Go, V. E. Kuz'michev // *Shvejnjaja promyshlennost'*. – 2014. – № 1. – С. 28–32.
7. GOST 31509 – 2012. Izdelija medicinskie jelastichnye fiksirujuchie i kompressionnye. Obshhin tehicheskie trebovanija. Metody ispytanij. – М. : Izdatel'stvo standartov, 2013. – 28 s.
8. Kyzymchuk, Olena. Stretch properties of elastic knitted fabric with pillar stitch / Olena Kyzymchuk, Liudmyla Melnyk // *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*. – 2018. – Vol. 13, No. 4, October-December. – P. 1–10. DOI: 10.1177/1558925018820722
9. GOST 16218.4-93. Izdelija tekstil'no-galanterejnye. Metod opredelenija plotnosti. – М. : Izd-vo standartov, 1995.
10. GOST 12023-2003. Materialy tekstil'nye. Polotna. Metody opredelenija tolshhiny. – М. : Izd-vo standartov, 1989.
11. GOST 8845-87. Polotna i izdelija trikotazhnye. Metody opredelenija vlazhnosti, massy i poverhnostnoj plotnosti. – М. : Izd-vo standartov, 2002. Quality Assurance RAL-GZ 387/1. Medical Compression Hosiery.

12. Kyzymchuk O. Influence of technological parameters on the basis weight of elasticized fabric / O. Kyzymchuk, L. Melnyk, V. Liakhova, I. Hubar // Bulletin of the Kyiv National University of Technologies and Design. Technical Science. - 2017. - № 3 (110). - P. 83-90.
13. Kyzymchuk O. Influence of technological parameters on the basis weight of elasticized fabric / O. Kyzymchuk, L. Melnyk, V. Liakhova, I. Hubar // Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnolohii ta dyzainu. Seriya Tekhnichni nauky. – 2017. – № 3 (110). – С. 83–90.
14. Ofitsiyni portal firmy SWISSLASTIC AG [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : <https://www.swisslastic.ch/en/products/pressure-measuring-devices-16>. Cassandra Kwon, Meghan Hegarty, William Oxenham, Kristin Thoney-Barletta, Edward Grant & Lawrence Reid (2018) An introduction to a new direct testing method for characterizing pressure in compression fabrics, The Journal of The Textile Institute, DOI: 10.1080/00405000.2018.1527966
15. Kwon, Cassandra. An indirect testing approach for characterizing pressure profiles of compression bandages and hosiery / Cassandra Kwon, Meghan Hegarty, William Oxenham, Kristin Thoney-Barletta, Edward Grant & Lawrence Reid // The Journal of The Textile Institute. – 2018. – Vol. 109:2. – P. 256–267. DOI: 10.1080/00405000.2017.1340079_2
16. Kwon, Cassandra. An introduction to a new direct testing method for characterizing pressure in compression fabrics / Cassandra Kwon, Meghan Hegarty, William Oxenham, Kristin Thoney-Barletta, Edward Grant & Lawrence Reid // The Journal of The Textile Institute. – 2018. – Published online : 19 Nov 2018. DOI: 10.1080/00405000.2018.1527966_2
17. Chattopadhyay, R. Effect of input tension of inlay yarn on the characteristics of knitted circular stretch fabrics and pressure generation, / R. Chattopadhyay, D. Gupta & M. Bera // The Journal of The Textile Institute. – 2012. – Vol. 103:6. – P. 636-642, DOI: 10.1080/00405000.2012.665237
18. Jariyapunya, Nareerut. Predictive modelling of compression garments for elastic fabric and the effects of pressure sensor thickness, / Nareerut Jariyapunya & Blažena Musilová // The Journal of The Textile Institute. – 2018. – Published online : 19 Nov 2018. DOI: 10.1080/00405000.2018.1540285

Рецензія/Peer review : 9.1.2019 р. Надрукована/Printed :10.4.2019 р.

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

К. І. ПЕТКО

Інститут органічної хімії НАН України, м. Київ

А. П. СТРОКАНЬ, Г. І. ХАРИТОНЕНКО

Київський національний університет технологій та дизайну

УДОСКОНАЛЕННЯ ЛАБОРАТОРНОГО МЕТОДУ ОКИСНЕННЯ БЕНЗИЛОВИХ СПИРТІВ ДО ВІДПОВІДНИХ АЛЬДЕГІДІВ

Досліджено реакцію окиснення *p*-метилбензилового та *p*-метоксибензилового спиртів до відповідних альдегідів дією розведеної азотної кислоти. Показано, що зниження концентрації кислоти або заміна азотної кислоти на азотисту дає можливість отримувати відповідні *p*-метил- та *p*-метоксибензальдегіди з більш високим виходом, порівняно з відомою методикою [1].

Ключові слова: *p*-метилбензальдегід, *p*-метоксибензальдегід, окиснення, бензиловий спирт, *p*-метилбензиловий спирт, *p*-метоксибензиловий спирт.

К. І. PETKO

Institute of Organic Chemistry NAS of Ukraine, Kyiv

A. P. STROKAN, A. I. KHARYTONENKO

Kyiv National University of Technologies and Design

IMPROVEMENT OF THE LABORATORY METHOD OF BENZYL ALCOHOLS OXIDATION TO THE RELEVANT ALDEHYDES

The reaction of oxidation of *p*-methylbenzyl, and *p*-methoxybenzyl alcohols to the corresponding aldehydes with the action of dilute nitric acid was investigated. It has been shown that a decrease in the concentration of nitric acid or the replacement of nitric to nitrous acid technique was devised for obtaining of corresponding *p*-methyl and *p*-methoxybenzaldehydes with a higher yield, as compared with the known method [1]. Aromatic aldehydes are widely used in organic synthesis, in particular in the synthesis of pharmaceuticals, perfumes, herbicides, pesticides, and many other chemical compounds with practical applications. Getting and studying the chemical properties of aromatic aldehydes in the laboratory workshop of students-pharmacists is a useful component of practical familiarization with the chemical processes of synthesis of drug compounds. There are quite a few techniques for obtaining aromatic aldehydes in laboratory conditions. The simplest from a formal point of view are the methods of oxidation of the corresponding benzyl alcohols. But the use in practice of such a method, as a rule, leads to low yields of the target products or their complete absence in the reaction medium. The authors of the article optimized the method of oxidation of benzyl alcohols to the corresponding benzaldehydes for cases in which the compounds have electron-donating substituents in the benzene core. The laboratory method for the production of *p*-methylbenzaldehyde and anisole aldehyde by oxidation of the corresponding benzyl alcohols was proposed.

Key words: *p*-methylbenzaldehyde, *p*-methoxybenzaldehyde, oxidation, benzyl alcohol, *p*-methylbenzyl alcohol, *p*-methoxybenzyl alcohol.

Вступ

Ароматичні альдегіди широко застосовуються в органічному синтезі, зокрема під час синтезу фармацевтичних препаратів, парфумів, гербіцидів, пестицидів та багатьох інших хімічних сполук, що мають практичне застосування. Безпосередньо сам бензальдегід використовується у складі багатьох парфумів (запах мигдалю), а інші ароматичні альдегіди завдяки своїй різноманітній реакційній здатності є вихідними синтонами для синтезу таких класів сполук, як, наприклад, 1,4-дигідропіридини (серцево-судинні препарати, Ніфедіпін, Форидон), похідні амфітаміну (нейротропні препарати Хлорметазон, Пірамін), бензімідазоли (препарат для зниження кров'яного тиску Дібазол) та багато інших.

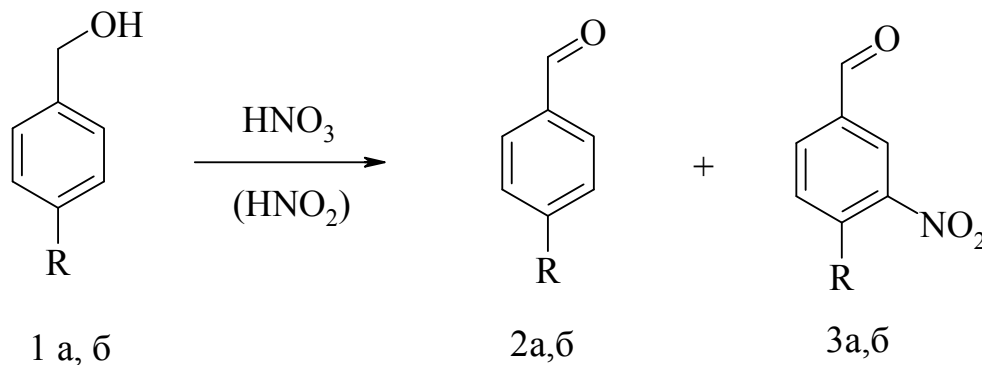
Отримання та вивчення хімічних властивостей ароматичних альдегідів в лабораторному практикумі студентів-фармацевтів є корисною складовою практичного ознайомлення з хімічними процесами синтезу лікарських сполук. Є досить багато методик отримання ароматичних альдегідів в лабораторних умовах. Найпростішими з формальної точки зору виглядають методики окиснення відповідних бензилових спиртів. Але використання на практиці такого методу, як правило, призводить до низьких виходів цільових продуктів або їх повної відсутності в реакційному середовищі, оскільки більшість окисників легше окиснюють сам бензальдегід до відповідної карбонової кислоти, ніж бензиловий спирт до бензальдегіду. Хоча застосування деяких окисників, таких як піридиній хлорохромат [2], третбутил-гідропероксид [3], триоксид ренію [4], нітробензол в присутності родієвого каталізатора [5] та інших, дозволило проводити окиснення бензилових спиртів до альдегідів з високими, та іноді, наприклад у випадку піридиній хлорохромату, майже кількісними виходами. Крім того, вище згадані окиснювальні агенти є, як правило, достатньо дорогими, та часто високотоксичними речовинами, що різко обмежує їх застосування в лабораторному практикумі студентів.

Нещодавно розроблено простий та зручний лабораторний спосіб одержання бензальдегіду із бензилового спирту який полягає у взаємодії вихідного бензилового спирту з розведеною (10%, тобто 1.6 моль/л) азотною кислотою. Виходи бензальдегіду сягають 95% [1]. Такий спосіб без сумніву є оптимальним для отримання бензальдегіду в лабораторних умовах, а також, при відповідних доробках, може бути запропонований як промисловий. Можна було припустити, що основною домішкою при використанні азотної кислоти є бензойна кислота. При відтворенні умов синтезу [1], нами було досліджено реакційну

суміш після відгонки з водяною парою цільового бензальдегіду. Було проведено екстракцію діетиловим етером, відділення бензойної кислоти у вигляді натрієвої солі з органічного розчину відмиванням розведеним лугом, та наступну відгонку розчинника. Після дослідження залишку методом тонкошарової хроматографії (ТШХ) було знайдено продукт нітрування бензальдегіду – мета-нітробензальдегід. Кількість його не перевищувала 2-3% від кількості вихідного бензильного спирту. У випадку незаміщеного бензильного спирту чи його похідних, що місять у бензойною кільці акцепторні замісники, побічна реакція нітрування практично не проходить, тому що азотна кислота розведена, тому має слабку нітруючу дію. Крім того, в кінцевому продукті ядро дезактивовано до електрофільних атак (введення нітрогрупи) наявністю альдегідної функції. Але, якщо в бензольному ядрі будуть знаходитись електронодорні групи, що активують реакцію нітрування, то виходить альдегідів при такому способі отримання будуть нижчими. Тому метою нашого дослідження було удосконалити методику отримання бензальдегідів із відповідних бензильних спиртів при наявності у бензольному ядрі електронодонорних замісників, що активують побічні процеси нітрування.

Експериментальна частина

Нами було досліджено реакцію *p*-метил- (1а) та *p*-метокси- (1б) бензильних спиртів з 10% азотною кислотою за методикою [1] (рис. 1).



R = CH₃ (а) OCH₃ (б).

Рис. 1. Реакція *p*-метил- (1а) та *p*-метокси (1б) бензильних спиртів з 10% азотною кислотою

При відтворенні умов окиснення приведених для бензильного спирту (кип'ятіння з активним перемішуванням протягом 40 хвилин та подальша перегонка з водяною парою цільових продуктів), для аналогів бензильного спирту 1а та 1б, як і очікувалось, виходить цільових продуктів 2а та 2б різко знизилася.

Так, *p*-метилбензальдегід (2а) був отриманий з виходом біля 45%, тоді як вихід анісового альдегіду (2б) що має більш електронодонорну метокси групу становив не більше 2-3%, тобто для останнього така методика є зовсім не прийнятною.

При дослідженні залишків після відгонки цільових продуктів 2а та 2б, було виділено у випадку *p*-метилбензальдегіду біля 10% продукту нітрування 3а, тоді як у випадку анісового альдегіду кількість продукту нітрування 3б досягала 45%.

Для оптимізації процесу, було використано більш низькі концентрації азотної кислоти. При використанні 5% розчину азотної кислоти в реакції окиснення сполуки 1а, продукти нітрування були виділені в дуже малих кількостях, але це призводило до зменшення швидкості прямої реакції; після відгонки продукту реакції в ньому було виявлено значну домішку (біля 20%) вихідного бензильного спирту.

Для отримання чистого продукту було збільшено тривалість процесу. При кип'ятінні з активним перемішуванням протягом 1,5 години, та подальшій відгонці з водяною парою було отримано чистий продукт 2а з виходом біля 65%. Під час дослідження побічних продуктів не було виявлено продукту нітрування 3а, а тільки *p*-толуїлову кислоту. Отже, таку методику можна вважати оптимальною для лабораторного використання.

При реакції *p*-метоксибензильного спирту 1б з 5% азотною кислотою вихід цільового анісового альдегіду становив лише 15%. Слід зазначити що анісовий альдегід (2б) менш летючий ніж його аналог (2а), тому час відгонки з водяною парою у цьому випадку потрібно більше часу – біля двох годин. Продукт 2а відганявся з реакційної суміші протягом 1 години. Оскільки збільшується час взаємодії з окисником при високій температурі, збільшується кількість продукту більш глибокого окиснення – відповідної бензойної кислоти. При дослідженні залишку після відгонки продукту було виявлено біля 10% продуктів нітрування, тобто більша частина альдегіду окислилася до відповідної бензойної кислоти. Зниженням концентрації азотної кислоти до 3% нам вдалося практично повністю уникнути побічного процесу нітрування, але час проходження реакції був збільшений до 3 годин, окиснення значною мірою відбувалося до бензойної кислоти. Вихід анісового альдегіду становив 25–27%. Часткове заміщення азотної кислоти на азотисту, яка має більш окиснюючі властивості при сумарній концентрації кислот 3-4% приводило до збільшення виходу

цільового продукті. Час реакції при такій комбінації окисників зменшився до 1 години. Вихід анісового альдегіду склав 48%, і хоча він є не дуже високим, але метод може бути запропонований як лабораторний спосіб отримання анісового альдегіду. Отже, наші методики, які характеризувалися найбільшим виходом, наступні.

п-Метилбензальдегід (2а) отримували нагріванням до кипіння при інтенсивному перемішуванні суміші 12.2 г (0.1 моль) п-метилбензиловго спирту та 120 мл (125 г, 0.1 моль HNO_3 у перерахунку на чисту кислоту) 5% азотної кислоти. Реакційну суміш продовжували перемішувати при кипінні протягом 1,5 годин. Контроль за відсутністю вихідного бензилового спирту проводили методом тонкошарової ТШХ. Очищення продукту проводили перегонкою з водяною парою до зникнення оливи у воді, що відганяється (біля 1 години). Цільовий продукт відділяли від водного шару та екстрагували діетиловим етером (2x100 мл). Розчинник випаровували та об'єднали з основним продуктом. Для очистки від води та залишків етеру продукт переганяли у вакуумі. Вихід продукту склав 7.8 г (65%). Т. кип. = 88-90 °С (20 мм. рт. ст.).

п-Метоксибензальдегід (2б) отримували нагріванням до кипіння при інтенсивному перемішуванні суміші 13.8 г (0.1 моль) п-метоксибензиловго спирту та 145 мл (155 г, 0.06 моль HNO_3 у перерахунку на чисту кислоту) 3% азотної кислоти, та 4.2 г (0.06 моль) нітриту натрію протягом 1 години. Контроль за відсутністю вихідного бензилового спирту проводили за методом ТШХ. Очищення продукту проводили перегонкою з водяною парою до зникнення оливи у воді, що відганяється (біля 2 годин). Цільовий продукт відділяли від водяного шару; залишки екстрагували діетиловим етером. Для очистки від води та залишків етеру продукт переганяли у вакуумі. Вихід продукту склав 6.4 г (48%). Т. кип. = 92-95 °С (20 мм. рт. ст.).

Висновки

Таким чином, нами оптимізовано спосіб окиснення бензилових спиртів до відповідних бензальдегідів для випадків, коли сполуки мають електроннодонорні замісники у бензольному ядрі. Запропоновано лабораторну методику отримання п-метилбензальдегіду та анісового альдегіду окисненням відповідних бензилових спиртів.

References

1. S. R. Joshi, K. L. Kataria, S. B. Sawant, J. B. Joshi // *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 44, № 2 (2005), p. 325–333.
2. K. L. Barlett, M. E. Blake, J. M. Lones // *Journ. of Amer. Chem. Soc.*, vol. 127, № 17 (2003), p. 6485–6488.
3. K. Khanmohamed, R. Mokhtar, R. Zendeheh // *Journ. of Chinese Chem. Soc.*, vol. 75, № 1 (2010), p. 205–212.
4. S. A. Sousa, J. R. Bernardo, A. C. Fernandes // *Tetr. Lett.*, vol. 53, № 14 (2012), p. 6205–6208.
5. G. F. Demg, Y. Chaol, S. Peng // *Org. Lett.*, vol. 22, № 11, p. 4888–4891.

Рецензія/Peer review : 4.3.2019 р. Надрукована/Printed : 10.4.2019 р.
Рецензент: д. т. н., проф. Мокроусова О. Р.

Р. В. ГАРГАУН, О. М. КУНИК, Д. Г. САРИБЕКОВА, З. М. ПОПОВА
Херсонський національний технічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СИЛІКОНІВ НА ВЛАСТИВОСТІ КОСМЕТИЧНИХ ЕМУЛЬСІЙ ПРЯМОГО ТИПУ

В статті наведені відомості щодо властивостей і застосування косметичних силіконів. Отримані дані було використано для розробки косметичної емульсії прямого типу з вмістом силіконів у концентраціях від 1 до 10%. У ході роботи досліджено вплив силіконів на реологічні та органолептичні властивості косметичної емульсії типу «олія у воді». В результаті визначено, що силікони сприяють покращенню реологічних та органолептичних властивостей косметичних емульсій залежно від їх концентрації у базовій суміші.

Ключові слова: прямі емульсії, силікони (поліорганосилоксани), реологічні властивості, органолептичні властивості.

R. V. HARHAUN, A. M. KUNIK, D. G. SARIBYKOVA, Z. M. POPOVA
Kherson National Technical University

RESEARCH THE INFLUENCE OF SILICONES ON THE PROPERTIES OF COSMETIC EMULSIONS OF THE DIRECT TYPE

The article provides information on the properties and application of cosmetic silicones. The obtained data was used to develop a direct type cosmetic emulsion containing silicones at certain concentrations. In the course of work, the effect of silicones on the rheological and organoleptic properties of a cosmetic emulsion such as oil in water has been investigated. With the help of analytical methods according to DSTU 4765: 2007 «Creams cosmetic. General technical conditions». The organoleptic, physical and chemical parameters of the quality of the emulsion studied with silicone content were determined. The rheological properties of the emulsion samples were investigated by determining the viscosity dependence and the applied shear stress from the shear rate of the emulsion samples under study on the «Reotest-2» rotary viscometer, sensory characteristics were determined by the Scoring method. As a result, it has been determined that silicones contribute to the improvement of the physical and chemical, rheological and organoleptic properties of cosmetic emulsions, depending on their concentration in the base mixture. Based on the data obtained before application in cosmetic emulsions recommended the following concentrations of the studied silicones: amodimethicone – 2, 3, 5, 7%; cyclopentasiloxane – 2, 5, 7, 10%; phenyltrimethicone – 3, 5, 7%.

Key words: direct emulsions, silicones (polyorganosiloxanes), rheological properties, organoleptic properties.

Постановка проблеми

Емульсійні основи у косметичних засобах відрізняються широким спектром застосування від кремів до декоративної косметики. Завдяки цілому ряду переваг виробники надають пріоритет саме емульсіям прямого типу. Емульсії типу «олія у воді» – це рідкі системи, в яких дисперсійне середовище складається з води, а дисперсна фаза із жирових компонентів та олій. Наявність підвищеного вмісту води в такій емульсії сприяє кращому розчиненню компонентів суміші та підвищує профілактичний ефект завдяки зростанню швидкості всмоктування активних компонентів у шкіру [1]. Вміст жирової фази у емульсіях прямого типу значно менший ніж води, однак це не погіршує їх властивостей і направлено ефекту, оскільки шкіра здатна поглинати лише до 10% жирових компонентів. До того ж така емульсійна система значно легше розподіляється, швидше поглинається і не залишає після нанесення жирного блиску на шкірі [2]. Для довготривалого застосування, особливо для сухої шкіри, даний тип емульсій є непридатним, оскільки внаслідок швидкої втрати води вони продовжують стимулювати трансепідермальну втрату вологи і тим самим підсилюють висихання шкіри [2]. Тому постає питання розробки удосконалених рецептур прямих емульсій шляхом введення до їх складу компонентів, які б перешкоджали втраті надлишку вологи, однак при цьому не погіршували б органолептичні та реологічні властивості емульсії.

Відкриття класу поліорганосилоксанів вважається одним з найбільших досягнень науки. Теоретичний аналіз наукової та технічної літератури свідчить про те, що кремнійорганічні полімери мають широке застосування у косметичних засобах, особливо у засобах по догляду за тілом і волоссям. Такі висновки ґрунтуються на специфічних властивостях силіконів [3–5]. Вони стійкі до гідролізу і окиснення, не володіють запахом, прозорі, хімічно інертні, не проникають у шкіру, є альтернативною заміною жирам у косметичці, ефективні в низьких концентраціях, дозволяють створювати стабільні формули косметики, мінімізувати пори і візуально приховувати зморшки, створювати матовість й інші оптичні ефекти, знижувати жирність і липкість, підвищувати водостійкість, покращувати рівномірність розподілу УФ-фільтрів, служать основою величезного розмаїття текстур з сенсорними властивостями, які неможливо отримати ні з якими іншими інгредієнтами. Згідно з висновками Cosmetic Ingredient Review [6] силікони визначаються як цілком безпечні компоненти для використання у косметичних препаратах.

Саме тому вивчення впливу силіконів на властивості емульсій та удосконалення технології їх застосування на сьогодні вважається актуальною темою для наукових досліджень.

Аналіз останніх досліджень

В останні роки силікони набули значної популярності у якості основної сировини у косметичній промисловості, дані твердження базуються на численних дослідженнях науковців [7–10]. Сучасні тенденції досліджень поліорганосилоксанів зосереджені на вивченні властивостей власне силіконів, особливостей структури окремих класів силіконів, методів синтезу та аналізу якості, їх безпечності для використання [7], на аналізі їх впливу на сенсорні характеристики [8], розробці нових видів емульгаторів на основі силіконів, які здатні значно підвищити стабільність колоїдної системи [9, 10].

У попередній роботі [11] авторами було розроблено рецептуру інертної косметичної емульсії з вмістом жирової фази 50%, яку було використано як основу для дослідження властивостей наступних силіконів: циклопентасилоксан (Brenntag, Німеччина), диметикон (BRB International BV, Нідерланди), SilCare Silicone SEA (Clariant, Швейцарія) та альтернативний замінник силіконів рослинного походження Cetiol C5 (BASF SE, Німеччина).

На підставі проведених досліджень визначено, що для створення якісного емульсійного косметичного засобу необхідне застосування поліорганосилоксанів синтетичного походження, оскільки не всі кондиціонуєчі агенти природного походження можуть виступати у якості їх повноцінних замінників [12].

Формулювання мети дослідження

Мета роботи полягала у виявленні та визначенні впливу кремнійорганічних полімерів на органолептичні, фізико-хімічні та реологічні властивості косметичної емульсії прямого типу з вмістом жирової фази 25%.

Виклад основного матеріалу

У якості об'єктів дослідження було запропоновано силікони зарубіжного виробництва компанії BRB International BV, Нідерланди, а саме: циклопентасилоксан, фенілтриметикон, амодиметикон. У якості основи для досліджень властивостей силіконів була використана розроблена косметична емульсія з наступним компонентним складом, %: мінеральна олія – 25, емульгатор (Eumulgin prisma) – 0,35, ко-емульгатор (цетеариловий спирт) – 4, консервант (метиловий ефір пара-гідроксibenзойної кислоти) – 0,5, дистильована вода – до 100.

Сама емульсія як колоїдна двофазна система володіє певними фізико-хімічними та органолептичними властивостями, які значною мірою залежать від рецептурних складових та їх співвідношення у системі. Допоміжні компоненти також проявляють певний вплив на фізико-хімічні та органолептичні показники розробленої емульсії. Дослідження органолептичних та фізико-хімічних показників косметичної емульсії з додаванням силіконів проводили згідно з ДСТУ 4765:2007 «Креми косметичні» [13] (табл. 1).

Таблиця 1

Органолептичні та фізико-хімічні показники розробленої емульсії з додаванням силіконів

Назва показника	Концентрація, %							Метод випробування
	0	1,0	2,0	3,0	5,0	7,0	10,0	
Амодиметикон								
Зовнішній вигляд	Однорідна текстура з в'язкою кремоподібною консистенцією, без сторонніх домішок							ГОСТ 29188.0
Колір	Білий колір, без сторонніх відтінків та вкраплень							ГОСТ 29188.0
Запах	Без запаху							ГОСТ 29188.0
Колоїдна стабільність	Стабільний							ГОСТ 29188.3
Термостабільність	Стабільний							ГОСТ 29188.3
(рН)	6,8	6,8	7,0	6,9	7,0	7,1	7,1	ГОСТ 29188.2
Циклопентасилоксан								
Зовнішній вигляд	Однорідна текстура з в'язкою кремоподібною консистенцією, без сторонніх домішок							ГОСТ 29188.0
Колір	Білий колір, без сторонніх відтінків та вкраплень							ГОСТ 29188.0
Запах	Без запаху							ГОСТ 29188.0
Колоїдна стабільність	Стабільний							ГОСТ 29188.3
Термостабільність	Стабільний							ГОСТ 29188.3
(рН)	6,8	6,8	6,9	6,9	7,0	7,0	7,0	ГОСТ 29188.2
Фенілтриметикон								
Зовнішній вигляд	Однорідна текстура з в'язкою кремоподібною консистенцією, без сторонніх домішок							ГОСТ 29188.0
Колір	Білий колір, без сторонніх відтінків та вкраплень							ГОСТ 29188.0
Запах	Без запаху							ГОСТ 29188.0
Колоїдна стабільність	Стабільний							ГОСТ 29188.3
Термостабільність	Стабільний							ГОСТ 29188.3
(рН)	6,8	6,9	7,0	7,0	6,9	6,8	6,9	ГОСТ 29188.2

Отримані результати свідчать, що розроблена базова емульсія та зразки емульсії з додаванням силіконів – амодиметикону, циклопентасилоксану і фенілтриметикону, у концентраціях від 1 до 10% відповідають встановленим нормам ДСТУ 4765:2007.

Оскільки запропоновані зразки емульсії відповідають вимогам ДСТУ, наступним етапом досліджень було визначення їх реологічних властивостей. Силікони зазвичай використовуються у косметичних препаратах у якості органолептичних та сенсорно-моделюючих компонентів, проте, доцільним було перевірити їх вплив на реологічні властивості емульсії, оскільки вони є складовою органолептики косметичних засобів. Оцінка реологічних властивостей зразків емульсії проводилася шляхом визначення залежності в'язкості та прикладеної напруги зсуву від швидкості зсуву досліджуваних зразків емульсії на

ротаційному віскозиметрі «Reotest-2» [14]. Результати дослідження зображено на рис. 1

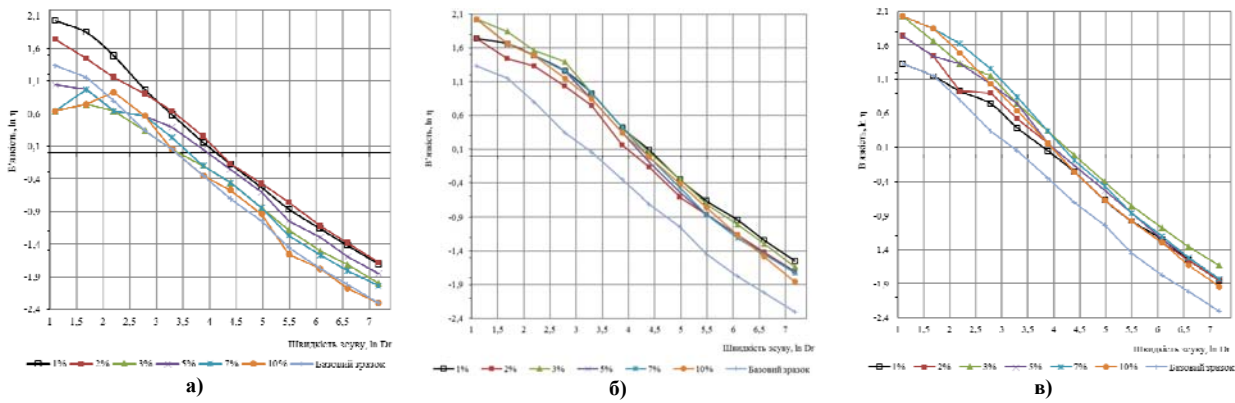


Рис. 1. Залежність в'язкості зразків емульсії з додаванням силіконів від швидкості зсуву: а) амодиметикон, б) циклопентасилоксан, в) фенілтриметикон

Результати дослідження (рис. 1) вказують, що введення до складу емульсії досліджуваних силіконів позитивно проявляє себе по відношенню до реологічних характеристик базової емульсії, шляхом підвищення показників її в'язкості та покращення консистенції.

Найбільш помітний вплив на в'язкість емульсії проявляють амодиметикон у концентраціях 1, 2 та 5%, циклопентасилоксан у концентраціях 1, 3 та 10%, і фенілтриметикон у концентраціях 3, 5 та 7%.

Складовою комплексу реологічних характеристик являється прикладена напруга зсуву. У реології напруга зсуву являє собою опір досліджуваної системи дії прикладеної сили. Співвідношення прикладеної напруги зсуву до швидкості зсуву називають в'язкістю, яка являється мірою опору рідини до потоку [15].

Результати дослідження залежності прикладеної напруги зсуву від швидкості зсуву зразків емульсії наведено на рис. 2.

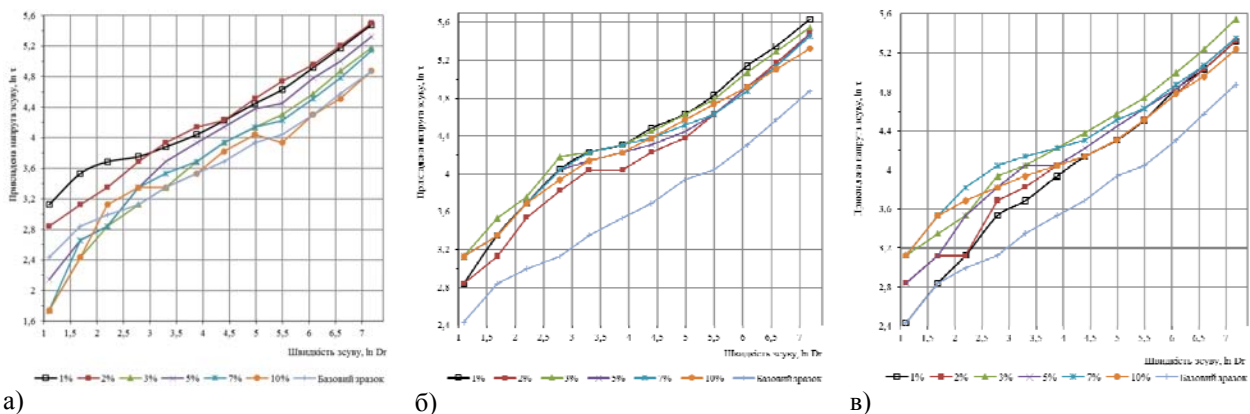


Рис. 2. Динаміка залежності напруги зсуву зразків емульсії з додаванням силіконів від швидкості зсуву: а) амодиметикон, б) циклопентасилоксан, в) фенілтриметикон

Проаналізувавши дані (рис. 2), можна зазначити, що введення до складу емульсії силіконів сприяє зростанню опору емульсії до дії механічного впливу, особливо помітний вплив проявляється у випадку з циклопентасилоксаном та фенілтриметиконом. Найбільш значний ефект опору проявляють емульсії з амодиметиконом (1, 2 і 5%), циклопентасилоксаном (1, 3, 7 і 10%) та фенілтриметиконом (3, 5, 7 і 10%), при збільшенні швидкості зсуву дана тенденція зберігається.

Реологічні властивості рідин, зокрема емульсій, включають в себе здатність системи відновлюватися до початкового стану після зняття зовнішніх факторів навантаження. Така властивість системи називається тиксотропією. В основі явища тиксотропії лежать кінетичні властивості системи. При дії зовнішньої напруги міжмолекулярні зв'язки рідкої системи руйнуються і при знятті навантаження через деякий час спокою відновлюються [16]. У ході досліджень реологічних властивостей зразків емульсії використовувалася прямий зростаючий хід швидкості зсуву та зворотний, при цьому було визначено, що криві їх значень не співпадають. Даний ефект викликаний зниженням в'язкості зразків емульсії в результаті довготривалих деформацій і зовнішніх навантажень. Результати розрахунків тиксотропного відновлення емульсій наведено у табл. 2.

Таблиця 2

Ступінь тиксотропного відновлення в'язкості, %

Емульсія з додаванням силіконів	Концентрація, %						
	0	1,0	2,0	3,0	5,0	7,0	10,0
Амодиметикон	61, 13	94,64	85,74	80,60	82,60	67,42	62,69
Циклопентасилоксан		93,31	89,50	84,93	87,77	78,80	77,90
Фенілтриметикон		77,87	81,02	76,12	77,43	75,35	70,70

Згідно з даними (табл. 2) можна зазначити, що найбільший ступінь тиксотропного відновлення спостерігається при введенні мінімальних концентрацій силіконів. Для амодиметикону і циклопентасилоксану це концентрація 1%, значення тиксотропності при цьому становить 94,64% та 93,31% відповідно. Для фенілтриметикону найбільший показник тиксотропності проявляється при концентрації 2% – 81,02%.

Враховуючи весь діапазон концентрацій силіконів (1–10%), найкращі показники відновлення в'язкості емульсій демонструють амодиметикон та циклопентасилоксан, найменші – фенілтриметикон.

Одним з основних складових органолептики виступає аналіз сенсорних властивостей. Сенсорні властивості розробленої емульсії з додаванням досліджуваних силіконів визначалися за Скоринг методом [17], шляхом виставлення бальної оцінки за десятибальною шкалою по кожному показнику. Даний метод визначення включає в себе наступні основні сенсорні показники: розтікання, розподіл, еластичність, поглинання шкірою, липкість, жирність, «бархатистість», матовість, м'якість, гладкість та відчуття догляду. Результати дослідження сенсорних властивостей зразків емульсій наведено на рис. 3.

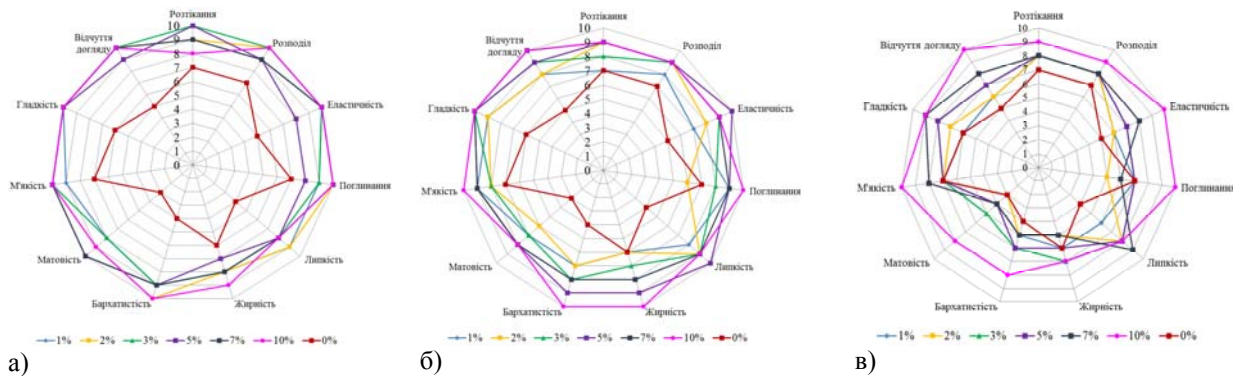


Рис. 3. Залежність сенсорних показників якості розробленої емульсії від концентрації силіконів: а) амодиметикон, б) циклопентасилоксан, в) фенілтриметикон

Аналіз даних рис. 3 свідчить, що досліджувані силікони сприяють покращенню сенсорних характеристик емульсії. Під час додавання амодиметикону і циклопентасилоксану у концентраціях 5, 7, та 10% проявляються високі показники розподілу і поглинання, з'являється приємне відчуття догляду, матовості, м'якості, гладкості та «бархатистості» шкіри, знижується липкість та жирність шкіри. Зразки емульсій з вмістом фенілтриметикону проявляють значно нижчі сенсорні показники, оптимальні характеристики проявляються при концентраціях 7 і 10%.

Висновки

1. Дослідним шляхом встановлено, що всі зразки емульсій з вмістом силіконів у межах концентрацій 1 – 10% відповідають нормам ДСТУ 4765: 2007 «Креми косметичні. Загальні технічні умови».

2. Встановлено, що введення силіконів у концентраціях амодиметикону – 1 та 2%, циклопентасилоксану і фенілтриметикону у межах 1–10% значно підвищують показники реологічних властивостей, зокрема в'язкість базової емульсії. При цьому визначено, що найбільший ступінь тиксотропного відновлення спостерігається при введенні мінімальних концентрацій силіконів, для амодиметикону і циклопентасилоксану – 1%, для фенілтриметикону – 2%.

3. У результаті органолептичних досліджень визначено, що досліджувані силікони сприяють покращенню сенсорних характеристик косметичних емульсій у наступних концентраціях: амодиметикон та циклопентасилоксан – 5, 7, 10%, фенілтриметикон – 7, 10%. Введення силіконів у даних концентраціях знижує жирність і липкість шкіри, покращує розподіл емульсії, надає шкірі приємного відчуття догляду, м'якості, гладкості, матовості та «бархатистості».

4. У результаті аналізу проведених реологічних та органолептичних досліджень визначено, що збільшення концентрації силіконів до 10% позитивно впливає на сенсорні властивості зразків емульсій, у той час як покращення реологічних властивостей емульсій спостерігається при знижених концентраціях силіконів – 1, 2%. Таким чином, в ході застосування досліджуваних силіконів у складі косметичних емульсій необхідно враховувати визначену закономірність для досягнення оптимального результату.

Література

1. Кутц Г. Косметические кремы и эмульсии: состав, получение, методы испытаний / Г. Кутц ; [перевод с нем. А.С. Филиппова]. – М. : Косметика и медицина, 2004. – 272 с.
2. Фридман Р.А. Технология косметики / Р.А. Фридман. – М. : Пищевая промышленность, 1984. – 487 с.
3. Самуйлова Л.В. Косметическая химия : учеб. пособ. Ч. 1: Ингредиенты / Л.В Самуйлова, Т.В. Пучкова. – М. : Школа косметических химиков, 2005. – 336 с.
4. Силиконы в косметике [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://womanwiki.ru/w>.
5. Космецевтика [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://nsp-zdorovje.narod.ru/article_kr/kosmetcevtika.

6. Cosmetic Ingredient Review [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.cir-safety.org/ingredients>
7. André o. Barel Handbook of cosmetic science and technology / André o. Barel, Marc paye, Howard I. Maibach / by Marcel Dekker, Inc. New York, 2001. – 903 p.
8. Марголина А.А. Наука и иллюзии в современной косметологии [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.nkj.ru/archive/articles/728/>
9. Denise-Silvia Mahrhauser Double emulsions based on silicone-fluorocarbon-water and their skin penetration / Denise-Silvia Mahrhauser Claudia Fischer, ClaudiaValenta // International Journal of Pharmaceutics. – 2016. – Vol. 498. – P. 130–133.
10. Lisa Binder Novel concentrated water-in-oil emulsions based on a non-ionic silicone surfactant: Appealing application properties and tuneable viscoelasticity / Lisa Binder, Johannes Jatschka, Dieter Baurecht, Michael Wirth, ClaudiaValenta // European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics. – 2017. – Vol. 120. – P. 34–42.
11. Івахненко Г.О. Дослідження реологічних властивостей силіконів та їх альтернативних заміників у косметичних емульсіях / Г.О. Івахненко, О.М. Куник, Д.Г. Сарібекова // Тези доповідей IV Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених і студентів [«Науково-практичні розробки молодих учених в хімічній, харчовій та парфумерно-косметичній галузях промисловості»], (Херсон, 30–31 жовтня 2017 р.). – Херсонський національний технічний університет, 2017. – С. 50–51.
12. Івахненко Г.О. Дослідження реологічних властивостей циклопентасилоксану у косметичних емульсіях / Г.О. Івахненко, О.М. Куник, Д.Г. Сарібекова // Матеріали V міжнародної науково-практичної конференції [«Хімія, біо- і нанотехнології, екологія та економіка в харчовій і косметичній промисловості»], (Харків, 17–18 жовтня 2017 р.). – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», 2017. – С. 41–43.
13. ДСТУ 4765: 2007. Креми косметичні. Загальні технічні умови.
14. Реотест-2.1. Цилиндрический и конусо-пластиночный ротационный вискозиметр. Инструкция по эксплуатации [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.twirpx.com/file/1543541>.
15. Кузнецов О.А. Реология пищевых масс: учебное пособие / О.А. Кузнецов, Е.В. Волошин, Р.Ф. Сагитов. – Оренбург : ОГУ, 2005. – 106 с.
16. Реология [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://morfo.phyche.ac.ru/Research_methods/Rheology/print_html.
17. Бондакова М.В. Разработка рецептуры и технологии производства косметических изделий с использованием экстракта винограда : дис. ... к.т.н. / Бондакова М.В. – Москва : МГУ, 2014.

References

1. Kutc G. Kosmeticheskie kremy i jemul'sii: sostav, poluchenie, metody ispytaniy / G. Kutc ; [perevod s nem. A.S. Filippova]. – М. : Kosmetika i medicina, 2004. – 272 s.
2. Fridman R.A. Tehnologija kosmetiki / R.A. Fridman. – М. : Pishhevaja promyshlennost', 1984. – 487 s.
3. Samujlova L.V. Kosmeticheskaja himija : ucheb. posob. Ch. 1: Ingredijenty / L.V. Samujlova, T.V. Puchkova. – М. : Shkola kosmeticheskikh himikov, 2005. – 336 s.
4. Silikony v kosmetike [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu : <http://womanwiki.ru/w>.
5. Kosmecevtika [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu : http://nsp-zdorovje.narod.ru/article_kr/kosmetcevtika.
6. Cosmetic Ingredient Review [Elektronnyy resurs]. – Rezhym dostupu : <https://www.cir-safety.org/ingredients>
7. André o. Barel Handbook of cosmetic science and technology / André o. Barel, Marc paye, Howard I. Maibach / by Marcel Dekker, Inc. New York, 2001. – 903 p.
8. Margolina A.A. Nauka i illjuzii v sovremennoj kosmetologii [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu : <https://www.nkj.ru/archive/articles/728/>
9. Denise-Silvia Mahrhauser Double emulsions based on silicone-fluorocarbon-water and their skin penetration / Denise-Silvia Mahrhauser Claudia Fischer, ClaudiaValenta // International Journal of Pharmaceutics. – 2016. – Vol. 498. – R. 130–133.
10. Lisa Binder Novel concentrated water-in-oil emulsions based on a non-ionic silicone surfactant: Appealing application properties and tuneable viscoelasticity / Lisa Binder, Johannes Jatschka, Dieter Baurecht, Michael Wirth, ClaudiaValenta // European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics. – 2017. – Vol. 120. – R. 34–42.
11. Ivakhnenko H.O. Doslidzhennia reolohichnykh vlastyvostei sylikoniv ta yikh alternatyvnykh zaminnykiv u kosmetychnykh emulsiyakh / H.O. Ivakhnenko, O.M. Kuniy, D.H. Saribekova // Tezy dopovidei IV vseukrainskoi naukovopraktychnoi konferentsii molodykh uchenykh i studentiv [«Naukovopraktychni rozrobky molodykh uchenykh v khimichnii, kharchovii ta parfumerno-kosmetychnii haluziyakh promyslovosti»], (Kherson, 30–31 zhovtnia 2017 r.). – Khersonskiy natsionalnyi tekhnichnyi universytet, 2017. – S. 50–51.
12. Ivakhnenko H.O. Doslidzhennia reolohichnykh vlastyvostei tsyklopentasyloksanu u kosmetychnykh emulsiyakh / H.O. Ivakhnenko, O.M. Kuniy, D.H. Saribekova // Materialy V mizhnarodnoi naukovopraktychnoi konferentsii [«Khimiia, bio- i nanotekhnologii, ekolohiia ta ekonomika v kharchovii i kosmetychnii promyslovosti»], (Kharkiv, 17–18 zhovtnia 2017 r.). – Natsionalnyi tekhnichnyi universytet «Kharkivskiy politekhnichnyi instytut», 2017. – S. 41–43.
13. DSTU 4765: 2007. Kremy kosmetychni. Zahalni tekhnichni umovy.
14. Reotest-2.1. Cilindricheskij i konuso-plastinocnyy rotacionnyy viskozimetr. Instrukcija po jekspluatácii [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu : <http://www.twirpx.com/file/1543541>.
15. Kuznecov O.A. Reologija pishhevyyh mass: uchebnoe posobie / O.A. Kuznecov, E.V. Voloshin, R.F. Sagitov. – Orenburg : OGU, 2005. – 106 s.
16. Reologija [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu : http://morfo.phyche.ac.ru/Research_methods/Rheology/print_html.
17. Bondakova M.V. Razrabotka receptury i tehnologii proizvodstva kosmeticheskikh izdelij s ispol'zovaniem jekstrakta vinograda : dis. ... k.t.n. / Bondakova M.V. – Moskva : MGU, 2014.

Рецензія/Peer review : 26.3.2019 р.

Надрукована/Printed : 10.4.2019 р.

Стаття прорецензована редакційною колегією

DOI 10.31891/2307-5732-2019-271-2-99-101
УДК 004.942:004.054

Р. Л. ГАВРИЛЮК, Р. В. КРАВЧУК, В. О. ФЕРЕНС, В. М. ЧЕШУН
Хмельницький національний університет

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ДІАГНОСТУВАННЯ СХЕМ ОПЕРАТИВНОЇ ПАМ'ЯТІ З ДОВІЛЬНИМ ДОСТУПОМ

В роботі наведено опис математичної моделі для організації тестового діагностування схем оперативної пам'яті з довільним доступом із комбінованим застосуванням трьох тестів в прямій та інверсній реалізація: "шахового", "чергування рядків 0/1" і "чергування стовпців 0/1".

Ключові слова: математична модель, оперативна пам'ять з довільним доступом, тестове комбіноване діагностування, технічна діагностика.

R. L. HAVRYLIUK, R. V. KRAVCHUK, V. O. FERENS, V. M. CHESHUN
Khmelnytskyi National University

MATHEMATICAL MODEL FOR THE TEST DIAGNOSTIC PROCESS OF RANDOM ACCESS MEMORY SCHEME

Increasing the internal complexity of modern discrete electronic components, including random access memory schemes, complicates the process of their verification. This leads to a reduction in the effectiveness of intuitive testing methods and the need for clearly formalized diagnostic methods based on the use of adequate mathematical models. The article describes a mathematical model based on the main provisions of technical diagnostics, the theory of test diagnostics, the theory of sets and matrices. It is designed to create fault models and models of tests in the implementation of combined diagnosis of random access memory schemes with the combined use of basic tests in direct and inverse implementations: test "chess", test "lines zero/one" and test "columns zero/one". Also, the model can be used to describe other variants of memory schemes tests. The models are based on the use of matrix models of memory schemes and formalized descriptions of operations of access to memory for recording and readings. The proposed mathematical model is intended to adequately reflect the important parameters of the diagnostic experiment, the peculiarities of the tests, ensure predictability and reliability of the results.

Key words: mathematical model, random access memory, combined diagnostic test, technical diagnostics.

Вступ

Стрімкий розвиток засобів електронної обчислювальної техніки, засобів зв'язку і управління, а також іншого електронного обладнання породили небувалий науково-технічний прогрес у всіх сферах людської діяльності. Цей розвиток, перш за все, базується на новітніх досягненнях мікроелектроніки зі створення сучасної елементної бази у вигляді мікропроцесорів та інших мікросхем великого та надвеликого ступеню інтеграції, в тому числі схем оперативної пам'яті. Вже сьогодні на кристалі інтегральної схеми може бути трильйони транзисторів, а мікросхема пам'яті може зберігати гігабайти двійкових даних [2, 3].

Слід відзначити, що збільшення інтегральної складності і функціональних можливостей мікропроцесорів, схем оперативної пам'яті та інших інтегральних компонентів зумовлює постійне зростання складності вирішуваних стосовно них задач технічної діагностики і актуальність вдосконалення існуючих і створення нових методів і засобів діагностування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Дослідження схем пам'яті як об'єктів діагностування дозволило зробити висновок, що сучасні схеми пам'яті є досить складними об'єктами діагностування через велику розрядність і ємність, але мають також позитивні для реалізації діагностування властивості, а саме однорідність і регулярність їх внутрішньої структурної організації.

Зазначені особливості схем пам'яті з довільним доступом зумовили їх відокремлення в окремий клас об'єктів діагностування та створення великої кількості тестів для їх перевірки [7, 8]. В той же час, зазначені тести не є універсальними і кожен із них передбачає перевірку тестованої пам'яті на певний вид несправностей [8]. Використання множини тестів для пошуку всіх видів несправностей оперативної пам'яті з довільним доступом за умови надзвичайно великої ємності діагностованої пам'яті виявляється надзвичайно тривалим процесом і, через це, є малоефективним при потоковій перевірці схем пам'яті в умовах масового виробництва. Це зумовлює актуальність розробки методів і засобів тестування схем оперативної пам'яті, які базуються на комбінованому використанні певних тестів в їх первинному або модифікованих варіантах. Комбінування тестів має за мету забезпечення достовірної перевірки схем пам'яті на наявність в них контрольованих видів несправностей з мінімальною кількістю виконуваних перевірочних операцій, що є запорукою зменшення тривалості процесу діагностування та підвищення його ефективності за часовим критерієм.

Постановка проблеми

Складність схем пам'яті як об'єктів діагностування та одночасна однорідність і регулярність їх внутрішньої структурної організації зумовлюють необхідність і зручність використання математичних моделей для постановки діагностичних експериментів.

Зокрема, останнім часом є значні досягнення у розробці маршових тестів для діагностування схем оперативної пам'яті, що базуються на адаптованих до них математичних моделях. Вузька орієнтація таких моделей робить їх ефективними для реалізації зазначених тестів, але недосконалими при моделюванні процесу діагностування пам'яті із застосуванням інших тестів. Через це під час постановки діагностичних експериментів виникає потреба адаптації існуючих математичних моделей або створення нових відповідно до наявних потреб і з урахуванням особливостей застосовуваних тестів.

Виконувані дослідження присвячені організації діагностування схем оперативної пам'яті з довільним доступом, що базується на комбінованому використанні трьох видів тестів ("шахового", "чергування рядків 0/1" і "чергування стовпців 0/1") в прямій та інверсній реалізаціях зі змінюваним напрямком проходження адресного простору, що потребує визначення математичного апарату для опису параметрів та принципів реалізації діагностичних випробувань.

Викладення основного матеріалу

Основою схеми будь-якого запам'ятовуючого пристрою є елемент пам'яті (статичного або динамічного типу), призначений для записування, зберігання і видачі одного біта даних. Сукупність спільно адресованих елементів пам'яті, які зберігають n -розрядне слово даних, утворюють комірку пам'яті, а множина комірок пам'яті утворює запам'ятовуючий масив схеми пам'яті, який називається матрицею елементів пам'яті.

Саме діагностування матриці елементів пам'яті є основним і найбільш трудомістким завданням при перевірці схем оперативної пам'яті з довільним доступом. Наявність доступу до всіх елементів матриці пам'яті і коректність їх роботи в усіх режимах свідчать про справність діагностованих схем оперативної пам'яті в цілому. Це свідчить про актуальність визначення способів формалізованого представлення матриці елементів пам'яті для подальшої презентації особливостей способів і засобів тестування схем оперативної пам'яті.

Для математичного опису запам'ятовуючої матриці схем оперативної пам'яті з довільним доступом будемо використовувати представлення у вигляді двох взаємопов'язаних множин:

- $K: \{k_1, k_2, \dots, k_i, \dots, k_n\}$ – множина комірок запам'ятовуючого пристрою (індекс i відповідає адресі комірки $k_i \in K$ в схемі пам'яті);

- $E_i: \{e_{i,1}, e_{i,2}, \dots, e_{i,j}, \dots, e_{i,r}\}$ – множина запам'ятовуючих елементів (розрядів) комірки $k_i \in K$.

Структурну організацію матриці запам'ятовуючих елементів схеми оперативної пам'яті з довільним доступом найбільш наочно і адекватно відображає саме матрична структура, що символічно подається у вигляді прямокутної матриці розмірності $n \times r$, де n – кількість адресованих одиниць даних, що зберігаються (фактично, кількість комірок пам'яті), r – розрядність пам'яті (тобто розрядність комірок пам'яті, $r \geq 1$).

На підставі наведеного опису введемо в математичну модель методу тестування схем оперативної пам'яті з довільним доступом матричну складову для відображення структурної організації матриці запам'ятовуючих елементів діагностованої схеми оперативної пам'яті:

M – матрична модель (розмірності $n \times r$) схеми оперативної пам'яті з довільним доступом пам'яті ємністю n комірок по r розрядів.

Класично, діагностична модель для перевірки функціональних здатностей об'єкта діагностування складається з математичного інструментарію, з допомогою якого можна адекватно описати типові операції, передбачувані в роботі об'єктів відповідного класу, і потім перевірити коректність виконання цих операцій об'єктом діагностування.

Для математичного опису функціональних особливостей досліджуваного класу об'єктів діагностування будемо використовувати опис операцій у вигляді множини:

$S: \{s_1, s_2, \dots, s_i, \dots, s_h\}$ – множина типових операцій, які використовуються для діагностування схем оперативної пам'яті з довільним доступом при реалізації методу.

Основними операціями схем оперативної пам'яті з довільним доступом є запис і зчитування певної одиниці двійкових даних фіксованого розміру, що розглядається стосовно багаторозрядних схем оперативної пам'яті з довільним доступом як слово даних. Операції запису і зчитування даних узагальнено називаються зверненням до пам'яті. Саме через операції звернення до пам'яті перевіряються та інші функції схем оперативної пам'яті з довільним доступом, такі як здатність зберігати дані і виконувати супутні сервісні операції.

Хоча, фактично, основних контрольних операцій для тестування схем оперативної пам'яті з довільним доступом є лише дві, але зазначені операції відрізняються в різних тестах за послідовністю застосування і використовуваними при їх реалізації даними.

Використовувані для тестування схем оперативної пам'яті з довільним доступом дані ідентифікуються як перевірочні двійкові тест-вектори. Для будь-якого методу діагностування можна визначити кінцеву множину використовуваних тест-векторів:

$T: \{t_1, t_2, \dots, t_i, \dots, t_m\}$ – множина тест-векторів розрядності r , що застосовуються для перевірки схем оперативної пам'яті з довільним доступом відповідної розрядності.

Саме особливостями застосовуваних тест-векторів $t_i \in T$ і порядком їх застосування при виконанні тестових випробувань з реалізацією типових операцій визначається здатність обраного методу тестування виявляти несправності схем пам'яті. Кожен вид тестів орієнтований на пошук обмеженої множини можливих несправностей. Ідентифікуємо зазначену множину в математичній моделі:

$L: \{l_1, l_2, \dots, l_i, \dots, l_k\}$ – множина контрольованих методом несправностей схем оперативної пам'яті з довільним доступом (контрольний набір несправностей).

Саме за множиною контрольованих несправностей порівнюють ефективність методів діагностування

схем оперативної пам'яті. Метод вважається більш ефективним за прототип, якщо він здатен виявляти більше несправностей досліджуваного класу об'єктів діагностування або орієнтований на аналогічний контрольний набір несправностей, але забезпечує їх достовірну перевірку меншою кількістю операцій.

Під час тестування схем оперативної пам'яті з довільним доступом операції $s_i \in S$ із застосуванням тест-векторів $t_i \in T$, як правило, прийнято також представляти формалізованими описами.

Проведені дослідження варіантів опису типових діагностичних операцій для тестування схем оперативної пам'яті в математичних моделях показують, що всі вони мають позитивні і негативні властивості [2–5]. З урахуванням позитивних і негативних властивостей досліджених варіантів, для створеного методу пропонується наступний варіант формалізованого опису операцій $s_i \in S$.

$W_i Z$ – узагальнене представлення операції запису в комірку з адресою i тест-вектора Z (двійкового слова розрядності r зі значенням Z).

Можливі модифіковані (уточнені) представлення операції $W_i Z$:

- $W_i |x|$ – операція запису в комірку з адресою i тест-вектора, утвореного повторенням значень x до отримання двійкового слова розрядності r ;

- $W_i |x|N|y|M$ – операція запису в комірку з адресою i тест-вектора, утвореного повторенням комбінації з N значень x та M значень y (x та y – двійкові значення, $x \neq y$);

$R_i Z$ – узагальнене представлення операції зчитування з комірки з адресою i вектора Z . Аналогічно наведеним для операції $W_i Z$, для операції $R_i Z$ передбачені модифіковані (уточнені) представлення;

- $R_i |x|$ – операція читання з комірки за адресою i вектора, що є повторенням значень x до отримання двійкового слова розрядності r ;

- $R_i |x|N|y|M$ – операція читання з комірки за адресою i вектора, що є повторенням комбінації з N значень x та M значень y (x та y – двійкові значення, $x \neq y$).

На основі запропонованих варіантів опису типових діагностичних операцій для тестування схем оперативної пам'яті з довільним доступом можна надати узагальнений опис прояву несправності:

$$W_i Z \rightarrow R_i Z \neq Z.$$

Наведена формула відображає ситуацію, коли після запису значення Z до комірки за адресою i операція зчитування даних з неї дає значення, що не дорівнює Z .

Висновки

Запропонована математична модель базується на основних положеннях технічної діагностики, теорії тестового діагностування, теорії множин і матриць. Вона призначена для створення моделей несправностей і використовуваних тестів в ході реалізації діагностування схем оперативної пам'яті з довільним доступом із комбінованим використанням в прямій та інверсній реалізаціях "шахового" тесту і тестів "чергування рядків 0/1" та "чергування стовпців 0/1". Модель також може бути використана для моделювання інших варіантів тестів схем пам'яті.

Література

1. Ярмолик В.Н. Обзор методов неразрушающего тестирования ОЗУ / В.Н. Ярмолик, А.П. Занкович // Доклады БГУИР. – Минск : БГУИР, 2005. – № 4 (12) – С. 62–72.
2. Иванюк А.А. Методы оптимизации микрокода встроенной аппаратуры самотестирования ОЗУ / А.А. Иванюк, А.А. Автушко // Доклады БГУИР. – Минск : БГУИР, 2010. – № 3 (49). – С. 104–110.
3. Ярмолик В.Н. Псевдоисчерпывающее тестирование запоминающих устройств на базе многократных маршевых тестов / В.Н. Ярмолик, И. Мрозек, В.А. Леванцевич // Информатика. – 2018. – Т. 15, № 1. – С. 110–121.
4. Wu Chi-Feng Fault simulation and test algorithm generation for random access memories / Chi-Feng Wu, Chih-Tsun Huang, Kuo-Liang Cheng, Cheng-Wen Wu // IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems. – 2002. – Vol. 21, Issue 4. – P. 480–490.
5. Li Jin-Fu March-based RAM diagnosis algorithms for stuck-at and coupling faults / Jin-Fu Li, Kuo-Liang Cheng, Chih-Tsun Huang, Cheng-Wen Wu // IEEE Trans. on Fuzzy Systems. – 2002. – Vol. 10, Issue 2. – P. 155–170.

Referenses

1. Jarmolik V.N. Obzor metodov nerazrushajushhego testirovanija OZU / V.N. Jarmolik, A.P. Zankovich // Doklady BGUIR. – Minsk : BGUIR, 2005. – № 4 (12) – S. 62–72.
2. Ivanjuk A.A. Metody optimizacii mikrokode vstroennoj apparatury samotestirovanija OZU / A.A. Ivanjuk, A.A. Avtushko // Doklady BGUIR. – Minsk : BGUIR, 2010. – № 3 (49). – S. 104–110.
3. Jarmolik V.N. Psevdoisчерpyvajushhee testirovanie zapominajushhih ustrojstv na baze mnogokratnyh marshevyyh testov / V.N. Jarmolik, I. Mrozek, V.A. Levancevich // Informatika. – 2018. – T. 15, № 1. – S. 110–121.
4. Wu Chi-Feng Fault simulation and test algorithm generation for random access memories / Chi-Feng Wu, Chih-Tsun Huang, Kuo-Liang Cheng, Cheng-Wen Wu // IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems. – 2002. – Vol. 21, Issue 4. – R. 480–490.
5. Li Jin-Fu March-based RAM diagnosis algorithms for stuck-at and coupling faults / Jin-Fu Li, Kuo-Liang Cheng, Chih-Tsun Huang, Cheng-Wen Wu // IEEE Trans. on Fuzzy Systems. – 2002. – Vol. 10, Issue 2. – R. 155–170.

Рецензія/Peer review : 24.2.2019 р.

Надрукована/Printed : 10.4.2019 р.

Рецензент: д. т. н., проф. Мясіщев О. А.

А. А. МЯСИЩЕВ, В. М. ПОЛОЗОВА
Хмельницкий национальный университет

ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ GPU И CPU ДЛЯ МАТРИЧНОГО УМНОЖЕНИЯ

В работе исследуется целесообразность применения графических процессоров при решении задач матричного умножения по сравнению с обычными многоядерными процессорами. Указываются особенности использования и проблемы установки библиотеки MAGMA. Для проведения вычислительных экспериментов рассмотрены две системы. В каждой из них установлен шестиядерный процессор (CPU) AMD. В первой системе использован графический процессор (GPU) Tesla C2075, во второй – GeForce GTX 480 фирмы «NVIDIA». GPU выполняют роль вычислительных ускорителей для решения задач матричного умножения. Причем в первом случае расчет выполняется с учетом распараллеливания по 6 ядрам процессора с использованием библиотек MPI, ScaLAPACK и ATLAS. Во втором и третьем случаях – распараллеливанием по ядрам GPU Tesla C2075 и GeForce GTX 480 с использованием технологии CUDA. Вычислительные системы работают под управлением операционной системы Linux Ubuntu. На них установлены компиляторы фортран и C++ с перечисленными выше библиотеками для 6-ядерного процессора. Для программирования на GPU Tesla C2075 и GeForce GTX 480 установлены драйверы nvidia и программное обеспечение CUDA Toolkit. Установлено, что производительность GPU GeForce GTX 480 и GPU Tesla C2075 выше производительности CPU AMD примерно в 3.5 и 6.3 раза соответственно для чисел с двойной точностью. А производительность GPU GeForce GTX 480 в 1.3 раза выше производительности GPU Tesla C2075 для чисел с одинарной точностью. Показано, что для достижения максимальной производительности GPU NVIDIA CUDA необходимо использование библиотек MAGMA или CUBLAS, которые дают ускорение расчетов примерно в 6.4 раза по сравнению с традиционным способом программирования с использованием глобальной памяти. Рассмотрено решение задачи матричного умножения с использованием разделяемой памяти. Показано, что в этом случае производительность GPU незначительно ниже по сравнению с использованием библиотек MAGMA. Показано, что производительность GPU при матричном умножении с использованием CUBLAS для GeForce GTX 480 практически равна пиковой производительности при двойной точности вычислений (пиковая - 168.1, полученная 165.1 Гигафлопс). Для GPU Tesla C2075 пиковая производительность почти в два раза выше полученной (пиковая - 515.2, полученная 300.6 Гигафлопс). Это указывает на недостаточную эффективность библиотеки CUBLAS и MAGMA для GPU Tesla.

Ключевые слова: GPU Tesla C2075, MAGMA, CUBLAS, CUDA, графический процессор, NVIDIA Tesla V100, SMP система, MPI, ScaLAPACK, ATLAS

A. A. MYASISCHEV, V. M. POLOZOVA
Khmelnytskyi National University

GPU AND CPU PERFORMANCE FOR MATRIX MULTIPLICATION

The paper investigates the expediency of using graphics processors when solving problems of matrix multiplication compared to conventional multi-core processors. Indicates the features of the use and installation problems of the library MAGMA. To carry out computational experiments, two systems were considered. Each of them has a six-core AMD processor. The first system uses a graphics processor (GPU) Tesla C2075, the second GeForce GTX 480 from NVIDIA. GPUs play the role of computational accelerators for solving problems of matrix multiplication. Moreover, in the first case, the calculation is performed taking into account parallelization across the 6 cores of the processor using the MPI, ScaLAPACK and ATLAS libraries. In the second and third cases - parallelization across the cores of the Tesla C2075 GPU and GeForce GTX 480 using the CUDA technology. Computing systems run under the Linux Ubuntu operating system. The compilers Fortran and C++ are installed on them with the libraries listed above for a 6-core processor. For programming on the Tesla C2075 GPU and GeForce GTX 480, the nvidia video driver and CUDA Toolkit software are installed. It has been established that the performance of the GPU GeForce GTX 480 and the GPU Tesla C2075 is higher than the performance of the AMD CPU by approximately 3.5 and 6.3 times, respectively, for double-precision numbers. And the performance of the GPU GeForce GTX 480 is 1.3 times higher than the performance of the GPU Tesla C2075 for numbers with single precision. It is shown that in order to achieve maximum performance of the NVIDIA CUDA GPU, it is necessary to use the MAGMA or CUBLAS libraries, which accelerate the calculations by about 6.4 times compared to the traditional programming method using global memory. The solution of the problem of matrix multiplication using shared memory is considered. It is shown that in this case the performance of the GPU is not significantly lower compared with the use of the MAGMA libraries. It is shown that GPU performance with matrix multiplication using CUBLAS for GeForce GTX 480 is almost equal to peak performance with double computational accuracy (peak - 168.1, obtained 165.1 Gigaflops). For the Tesla C2075 GPU, the peak performance is almost twice as high as obtained (peak - 515.2, obtained 300.6 Gigaflops). This indicates a lack of effectiveness of the CUBLAS and MAGMA libraries for the Tesla GPU.

Keywords: GPU Tesla C2075, MAGMA, CUBLAS, CUDA, graphics processor, NVIDIA Tesla V100, SMP system, MPI, ScaLAPACK, ATLAS.

Постановка задачи

Задачи теории упругости, пластичности сводятся к системе дифференциальных уравнений в напряжениях и скоростях. Обычно они решаются численно с использованием метода конечных элементов. В свою очередь, этот метод сводится к построению так называемых матриц жесткости и решению систем линейных уравнений, содержащей тысячи, десятки тысяч и даже сотни тысяч неизвестных. Для упругопластических и пластических задач решение систем уравнений приходится выполнять сотни и тысячи раз для выявления конечной конфигурации деформируемого материала. Для этих целей требуются вычислительные системы высокой производительности. В настоящее время широкое распространение получили компьютеры с многоядерными процессорами, представляющие собой параллельную

вычислительную систему с общей памятью (SMP-система). С появлением чипа NVIDIA восьмого поколения G80 (2007 г.) возникла программно-аппаратная архитектура CUDA, позволяющая производить вычисления с использованием графических процессоров NVIDIA. Эта технология представляет собой, как и в случае с процессором, параллельную вычислительную систему, в составе которой работает сотни процессорных ядер. Проблема заключается в том, чтобы распараллелить перемножение матриц так, чтобы получить максимальную загрузку многоядерного процессора CPU и процессорных ядер GPU и сопоставить, насколько отличается производительность GPU от CPU для решения подобных задач при использовании чисел двойной точности.

Изложение основного материала работы

Известны многочисленные работы, посвященные исследованию производительности работы параллельных систем, как на базе кластерных систем, так и многоядерных процессоров [1, 2, 4, 5, 7–9]. Например, в работах [6, 7, 9] представлены решения ряда задач на GPU NVIDIA. Однако не был проведен подробный анализ возможностей GPU NVIDIA при использовании как простых методов программирования, так и методов программирования на базе библиотек программ cuBLAS (CUDA Basic Linear Algebra Subroutines), MAGMA (Matrix Algebra on GPU and Multicore Architectures) [10, 11] для решения задач матричного умножения с числами одинарной и двойной точности.

В настоящее время компания Nvidia представила ускоритель на базе архитектуры Volta - Tesla V100 [3]. Данное устройство располагает высоким уровнем вычислительной мощности, составляющим около 15 Тфлопс в операциях одинарной точности и 7,5 Тфлопс в двойной, что позволяет его использовать в современных суперкомпьютерных системах [14]. Также Nvidia представила новое семейство графических процессоров GeForce RTX 20 Series [15] основанных на новой архитектуре Turing, вычислительные возможности которых для операций с одинарной точностью составляют около 12 Тфлопс, двойной – 0.37 Тфлопс. Однако в настоящее время все еще актуальными являются бюджетные GPU на базе NVIDIA Tesla C2075 и видеокарте NVIDIA GeForce GTX 480, которые установлены на многих рабочих станциях, используемых для высокопроизводительных вычислений. Поэтому в работе будет уделено внимание проведению вычислительных экспериментов для этих GPU, а в качестве многоядерного процессора с SMP архитектурой будет рассмотрен компьютер с процессором AMD Phenom II X6 1090T (CPU, 3.2 ГГц).

Целью работы является исследование целесообразности применения графических процессоров при решении задачи матричного умножения по сравнению с обычными многоядерными процессорами. Рассматриваются особенности использования и проблемы установки библиотеки MAGMA.

Для достижения цели использовались две вычислительные системы:

- в первой установлен процессор (CPU) AMD Phenom II X6 1090T с частотой 3.2 ГГц и графический процессор (GPU) Tesla C2075 фирмы «NVIDIA»;
- во второй также установлен процессор (CPU) AMD Phenom II X6 1090T с частотой 3.2 ГГц, но с графическим процессором (GPU) GeForce GTX 480 фирмы «NVIDIA».

Для решения задач проводился вычислительный эксперимент в котором определялась производительность в GFlop/s и время расчета на двух указанных выше вычислительных системах задачи матричного умножения. Использовались тестовые примеры с библиотек ScaLAPACK, ATLAS, MAGMA, CUBLAS. Также использовались собственные программы на базе рассмотренных библиотек и традиционных способов программирования.

В первом случае расчет будет выполняться с учетом распараллеливания по 6-ядрам процессора с использованием библиотек MPI, ScaLAPACK и ATLAS [1, 2, 4]. Во втором и третьем случаях – распараллеливанием по ядрам GPU Tesla C2075 и GeForce GTX 480 с использованием технологии CUDA [7]. Вычислительные системы работают под управлением операционной системы Linux Ubuntu. На них установлены компиляторы фортран F77, gfortran с перечисленными выше библиотеками для 6-ядерного процессора. Для программирования на GPU Tesla C2075 и GeForce GTX 480 инсталлированы видеодрайвер nvidia и программное обеспечение CUDA Toolkit с сайта <http://developer.nvidia.com/cuda-toolkit-archive>. Последовательность установки программного обеспечения для GPU представлена в источнике [12]. Установка библиотек MPI, ScaLAPACK, ATLAS под ОС Linux Ubuntu представлена в работе [5] для системы с 4-ядерным процессором CORE 2 QUAD PENTIUM Q6600 2.4GHZ, поэтому здесь не рассматривается. Установка библиотеки MAGMA и решением проблем, которые возникают при ее установке рассмотрены в работе [6].

Как указано в работе [6] компиляция тестовых программ testing_sgemv.cpp и testing_dgemv.cpp перемножения матриц с числами одинарной и двойной точности соответственно выполняется командными строками:

```
gcc -O3 -DADD_ -DGPUSHMEM=200 -I/usr/local/cuda/include -I./include -I./quark/include -c
testing_dgemv.cpp -o testing_dgemv.o
gcc -O3 -DADD_ -DGPUSHMEM=200 -fPIC -Xlinker -zmuldefs -DGPUSHMEM=200 testing_dgemv.o
-o testing_dgemv lin/liblapacktest.a -L./lib -lcuda -lmagma -lmagmablas -lmagma -L/usr/local/cuda/lib -L/usr/lib
-lcblas -llapack -lpthread -lcublas -lcudart -lm
```

При запуске этих программ выполняется сопоставление производительностей расчета для библиотек cuBLAS и MAGMA. Производительность фиксируется в GFlop/s. Перед компиляцией этих тестовых программ необходимо откорректировать параметры `istart = 1024` и `iend = 10240`, которые задают

начальные и конечные значения размерностей матриц 1024 и 10240. Слишком большие их значения могут не поместиться в глобальную память GPU. Рассмотрим результаты работы программ testing_sgemmm.cpp и testing_dgemmm.cpp для GPU GeForce GTX 480:

./testing_sgemmm

device 0: GeForce GTX 480, 1401.0 MHz clock, 1535.2 MB memory

Testing transA = N transB = N

M	N	K	MAGMA GFlop/s	CUBLAS GFlop/s	error
1024	1024	1024	670.04	649.38	0.000000e+00
1280	1280	1280	685.46	696.84	0.000000e+00
1600	1600	1600	756.35	698.86	0.000000e+00
2000	2000	2000	792.98	688.97	0.000000e+00
2500	2500	2500	763.24	779.94	0.000000e+00
3125	3125	3125	803.20	776.03	0.000000e+00
3906	3906	3906	812.69	776.12	0.000000e+00
4882	4882	4882	825.38	791.58	0.000000e+00...
6102	6102	6102	820.70	818.51	0.000000e+00
7627	7627	7627	824.92	826.61	0.000000e+00
9533	9533	9533	825.42	844.12	0.000000e+00

./testing_dgemmm

device 0: GeForce GTX 480, 1401.0 MHz clock, 1535.2 MB memory

Testing transA = N transB = N

M	N	K	MAGMA GFlop/s	CUBLAS GFlop/s	error
1024	1024	1024	154.26	154.56	0.000000e+00
1280	1280	1280	161.57	161.80	0.000000e+00
1600	1600	1600	162.78	162.97	0.000000e+00
2000	2000	2000	155.17	160.45	0.000000e+00
2500	2500	2500	155.78	162.03	0.000000e+00
3125	3125	3125	162.14	161.00	0.000000e+00
3906	3906	3906	158.81	163.31	0.000000e+00
4882	4882	4882	161.21	163.45	0.000000e+00
6102	6102	6102	162.44	164.08	0.000000e+00

Сопоставляя результаты, видим, что чем больше размер матрицы, тем быстрее работает библиотека CUBLAS. Однако разница в производительности двух библиотек незначительная. Резко падает производительность при переходе от чисел с одинарной точности к двойной точности (примерно в 5.1 раза). Расчеты для GPU GeForce GTX 480 были выполнены режима Fermi family.

Рассмотрим аналогичные результаты расчета для GPU Tesla C2075 для режима Fermi family.

./testing_sgemmm

device 0: Tesla C2075, 1147.0 MHz clock, 5375.2 MB memory

Testing transA = N transB = N

M	N	K	MAGMA GFlop/s	CUBLAS GFlop/s	error
1024	1024	1024	551.34	431.39	7.629395e-06
1280	1280	1280	566.34	516.79	7.629395e-06
1600	1600	1600	600.45	514.57	7.629395e-06
2000	2000	2000	617.14	525.37	1.525879e-05
2500	2500	2500	585.90	605.09	1.525879e-05
3125	3125	3125	622.99	573.94	1.525879e-05
3906	3906	3906	629.77	579.80	3.051758e-05
4882	4882	4882	640.83	585.94	3.051758e-05
6102	6102	6102	637.69	613.76	3.051758e-05
9533	9533	9533	639.57	639.24	6.103516e-05

./testing_dgemmm

device 0: Tesla C2075, 1147.0 MHz clock, 5375.2 MB memory

Testing transA = N transB = N

M	N	K	MAGMA GFlop/s	CUBLAS GFlop/s	error
1024	1024	1024	279.11	280.61	0.000000e+00
1280	1280	1280	290.00	290.87	0.000000e+00
1600	1600	1600	294.01	294.44	0.000000e+00
2000	2000	2000	281.17	287.59	2.842171e-14
2500	2500	2500	282.24	285.60	2.842171e-14

3125	3125	3125	295.79	278.13	2.842171e-14
3906	3906	3906	289.47	291.83	5.684342e-14
4882	4882	4882	293.89	291.59	5.684342e-14
6102	6102	6102	295.99	293.87	5.684342e-14
9533	9533	9533	300.77	293.83	1.136868e-13

Видно, что библиотека MAGMA имеет производительность немного выше CUBLAS для матриц большого размера. Производительность при переходе от чисел с одинарной точности к двойной точности для этого GPU падает примерно в 2 раза как в случае с многоядерными 64-разрядными процессорами. В работе выполнены сравнительные расчеты и для режима компиляции Tesla family.

Проанализируем, насколько выше эффективность работы GPU по технологии NVIDIA CUDA по сравнению с традиционным способом написания параллельных программ. Для этого сопоставим эффективность работы программ умножения матриц с использованием глобальной памяти GPU, разделяемой памяти, которые составлены по методике, изложенной в работах [7, 9] с программой, использующей библиотеки MAGMA и CUBLAS.

Для составления программы с использованием глобальной памяти GPU рассмотрим программную модель GPU для компилятора Си [9]. Верхний уровень ядра, называемый сеткой (grid) состоит из блоков. В свою очередь блоки представляют собой либо одномерную, либо двухмерную сеть нитей. Вышесказанное может быть проиллюстрировано рис. 1. Номер нити в блоке или номер блока в grid может быть переменной типа int или dim3.

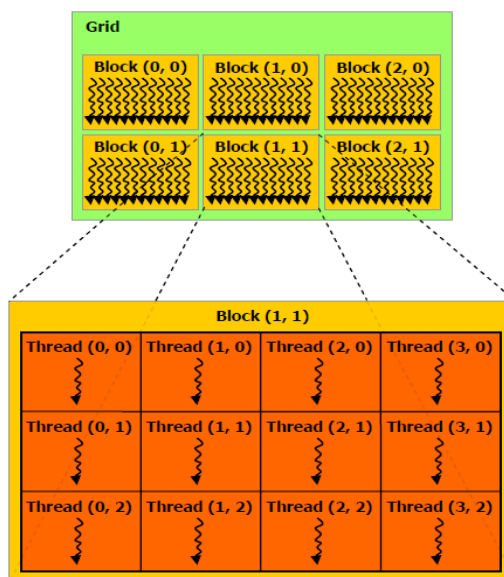


Рис. 1. Программная модель GPU

Число нитей, входящих в блок определяется встроенной переменной `blockDim`. Индекс нити внутри блока определяется переменной `threadIdx`, а индекс блока внутри grid – переменной `blockIdx`. Нити в блоке являются непосредственными исполнителями вычислений. Нить является 3-компонентным вектором, т.е. может идентифицироваться, используя одно размерный, двух размерный и трех размерный индекс нити, образуя в свою очередь одномерный, двух размерный и трех размерный блок нитей. Существует ограничение количества нитей на один блок, которое не может превышать 1024 нити. Расширение Си CUDA позволяет вызвать функцию, называемую ядром так, что она будет параллельно выполнять N разных нитей CUDA. Такие функция декларируется спецификатором `__global__`.

Ниже рассматриваются программы произведения квадратных заполненных матриц, которые использованы для сопоставления производительности CPU и GPU. Программы разбиты на три класса в соответствии с типом используемой памяти на GPU и библиотеки расчета произведения [7, 9]:

1. При расчете произведения матрицы размещаются в глобальной памяти GPU.
2. Матрицы размещаются в разделяемой памяти GPU.
3. Расчет выполняется программой, использующей библиотеки MAGMA и CUBLAS.

Первая программа. Предполагается, что матрицы `a`, `b` и `c` размещаются в одномерных массивах.

Ниже представлен текст программы с пояснениями:

```
#include <stdio.h>
#define BLOCK 16 //Устанавливаем размер блока
__global__ void mulMatr(float* a, float* b, float* c, int n) // Функция умножения двух матриц
{ //Получаем id текущей нити.
    int i = threadIdx.y+blockIdx.y*blockDim.y; int j = threadIdx.x+blockIdx.x*blockDim.x;
    float sum=0.0f; //Рассчитываем результат.
    for(int p = 0; p < n; p++){ sum+= a[i*n + p] * b[p*n + j];} c[i*n+j] = sum;}
__host__ int main()
```

```

{int N; int M; float mf=0.0f; printf ( "Input N->"); scanf ( "%d",&N);
printf ( "Matrix = %dx%d elements\n", N,N ); M=N*N;
float* a = new float[M]; float* b = new float[M]; float* c = new float[M]; //Выделяем память под
вектора
for (int i = 0; i < N; i++){//Инициализируем значения векторов
for (int j = 0; j < N; j++) { a[i*N+j] = 1.0f*((i+1)+2*(j+1)); b[i*N+j] = 1.0f/a[i*N+j];}}
float* deva;float* devb;float* devc; //Указатели на память в видеокарте
//Выделяем память для векторов на видеокарте
cudaMalloc((void**)&deva, sizeof(float) * M);cudaMalloc((void**)&devb, sizeof(float) * M);
cudaMalloc((void**)&devc, sizeof(float) * M);
// create cuda event handle
cudaEvent_t start, stop;float gpuTime=0.0f;cudaEventCreate ( &start );cudaEventCreate ( &stop );
//Копируем данные в память видеокарты
cudaMemcpy(deva, a, sizeof(float) * M, cudaMemcpyHostToDevice);
cudaMemcpy(devb, b, sizeof(float) * M, cudaMemcpyHostToDevice);
//Выполняем вызов функции ядра
dim3 threads = dim3(BLOCK,BLOCK); // Количество нитей в блоке
dim3 blocks = dim3(N/BLOCK,N/BLOCK); // Количество блоков в grid-е
cudaEventRecord(start, 0); // привязываем событие к началу выполнения ядра
mulMatr<<<blocks, threads>>>(deva, devb, devc,N);
cudaEventRecord(stop, 0); // привязываем событие к концу выполнения ядра. Получаем результат
расчета
cudaMemcpy(c, devc, sizeof(float) * M, cudaMemcpyDeviceToHost);
cudaEventSynchronize(stop); //Дожидаемся выполнение ядра, синхронизируя по событию stop
cudaEventElapsedTime (&gpuTime,start,stop);//Запрашиваем время между start, stop
//Результаты расчета
gpuTime=gpuTime/1000; mf=((2.0*N-1)*N*N)/(gpuTime*1000000.0);
printf("time=%.4fsec\nspeed=%.2fMFlops\n",gpuTime,mf);
printf("i=%d\tj=%d\tC=%.5f\n",N/256,N/128,c[(N/256)*N+(N/128)]);
printf("i=%d\tj=%d\tC=%.5f\n",3*N/4,5*N/16,c[(3*N/4)*N+(5*N/16)]);
printf("i=%d\tj=%d\tC=%.5f\n",N-4,N-2,c[(N-4)*N+(N-2)]);
// Высвобождаем ресурсы
cudaEventDestroy(start); cudaEventDestroy(stop); cudaFree(deva);cudaFree(devb);cudaFree(devc);
delete[] a; a = 0;delete[] b; b = 0;delete[] c; c = 0; }

```

Вторая программа. В функции ядра используется разделяемая память. Здесь принимается, что из-за малого размера разделяемой памяти, исходные квадратные матрицы разбиваются на блочные матрицы размером 16x16 элементов (BLOCK_SIZE 16), как в работе [5]. Текст представленной программы, которая выполняется на GPU (`__global__ void matrixMul`), соответствует тексту программы-примера, которая поставляется с сайта <http://developer.nvidia.com/cuda-toolkit-32-downloads> под именем `matrixMul_kernel.cu`.

```

#include <stdio.h>
#define BLOCK_SIZE 16
#define AS(i, j) As[i][j]
#define BS(i, j) Bs[i][j]
__global__ void
matrixMul( double* C, double* A, double* B, int wA, int wB)
{
int bx = blockIdx.x; int by = blockIdx.y; // Block index
int tx = threadIdx.x; int ty = threadIdx.y; // Thread index
int aBegin = wA * BLOCK_SIZE * by; // Index of the first sub-matrix of A processed by the
block
int aEnd = aBegin + wA - 1; // Index of the last sub-matrix of A processed by the block
int aStep = BLOCK_SIZE; // Step size used to iterate through the sub-matrices of A
int bBegin = BLOCK_SIZE * bx; // Index of the first sub-matrix of B processed by the block
int bStep = BLOCK_SIZE * wB; // Step size used to iterate through the sub-matrices of B
double Csub = 0; // Csub is used to store the element of the block sub-matrix that is
computed by the thread
// Loop over all the sub-matrices of A and B required to compute the block sub-matrix
for (int a = aBegin, b = bBegin; a <= aEnd; a += aStep, b += bStep) {
// Declaration of the shared memory array As used to store the sub-matrix of A
__shared__ double As[BLOCK_SIZE][BLOCK_SIZE];
// Declaration of the shared memory array Bs used to store the sub-matrix of B
__shared__ double Bs[BLOCK_SIZE][BLOCK_SIZE];
// Load the matrices from device memory to shared memory; each thread loads one element
of each matrix
AS(ty, tx) = A[a + wA * ty + tx]; BS(ty, tx) = B[b + wB * ty + tx];
__syncthreads(); // Synchronize to make sure the matrices are loaded
// Multiply the two matrices together; each thread computes one element of the block sub-
matrix
for (int k = 0; k < BLOCK_SIZE; ++k) Csub += AS(ty, k) * BS(k, tx);
// Synchronize to make sure that the preceding computation is done before loading two new sub-
matrices of A and B in // the next iteration
__syncthreads(); }
// Write the block sub-matrix to device memory; each thread writes one element
int c = wB * BLOCK_SIZE * by + BLOCK_SIZE * bx; C[c + wB * ty + tx] = Csub; }
__host__ int main()
{ int N; int M; double mf=0.0f;
printf ( "Input N->"); scanf ( "%d",&N); printf ( "Matrix = %dx%d elements\n", N,N ); M=N*N;
//Выделяем память под вектора
double* a = new double[M]; double* b = new double[M]; double* c = new double[M];
//Инициализируем значения векторов

```

```

for (int i = 0; i < N; i++){ for (int j = 0; j < N; j++) { a[i*N+j] = 1.0*((i+1)+2*(j+1));
b[i*N+j] = 1.0/a[i*N+j]; } }
double* deva; double* devb; double* devc; //Указатели на память в видеокарте
//Выделяем память для векторов на видеокарте
cudaMalloc((void**)&deva, sizeof(double) * M); cudaMalloc((void**)&devb, sizeof(double) * M);
cudaMalloc((void**)&devc, sizeof(double) * M);
// create cuda event handle
cudaEvent_t start, stop; float gpuTime=0.0f; cudaEventCreate ( &start ); cudaEventCreate ( &stop
);
//Копируем данные в память видеокарты
cudaMemcpy(deva, a, sizeof(double) * M, cudaMemcpyHostToDevice);
cudaMemcpy(devb, b, sizeof(double) * M, cudaMemcpyHostToDevice);
//Выполняем вызов функции ядра
dim3 threads = dim3(BLOCK_SIZE,BLOCK_SIZE); dim3 blocks = dim3(N/BLOCK_SIZE,N/BLOCK_SIZE);
cudaEventRecord(start, 0); // привязываем событие к началу выполнения ядра
matrixMul<<<blocks, threads>>>(devc, deva, devb,N,N); cudaEventRecord(stop, 0); // привязываем
событие
//к концу выполнения ядра
cudaMemcpy(c, devc, sizeof(double) * M, cudaMemcpyDeviceToHost); //Получаем результат расчета
cudaEventSynchronize(stop); //Дожидаемся выполнения ядра, синхронизируя по событию stop
cudaEventElapsedTime (&gpuTime,start,stop); //Запрашиваем время между start, stop
//Результаты расчета
gpuTime=gpuTime/1000;
mf=((2.0*N-1)*N*N)/(gpuTime*1000000.0); printf("time=%.4fsec\nspeed=%0.2fMFlops\n", gpuTime,mf);
printf("i=%d\tj=%d\tC=%.5f\n",N/256,N/128,c[(N/256)*N+(N/128)]);
printf("i=%d\tj=%d\tC=%.5f\n",3*N/4,5*N/16,c[(3*N/4)*N+(5*N/16)]);
printf("i=%d\tj=%d\tC=%.5f\n",N-4,N-2,c[(N-4)*N+(N-2)]);
// Высвобождаем ресурсы
cudaEventDestroy(start); cudaEventDestroy(stop); cudaFree(deva); cudaFree(devb);
cudaFree(devc);
delete[] a; a = 0; delete[] b; b = 0; delete[] c; c = 0;}

```

Третья программа. Использует библиотечные функции.

```

#include <stdio.h>
#include <cuda.h>
#include <cublas.h>
#include "magma.h"
#include "magma_lapack.h"
int main ( int argc, char** argv )
{float time_seconds=0.0f; float mf=0.0f;
cudaEvent_t start, stop;cudaEventCreate ( &start );cudaEventCreate ( &stop );
int N=6144; printf ( "Input N->");if (scanf ( "%d",&N)==1){printf ( "Matrix = %dх%d elements\n",
N,N );}
int M=N*N; float *d_A, *d_B, *d_C;float* A = new float[M]; float* B = new float[M];
float* C = new float[M];
for (int j = 0; j < N; j++){for (int i = 0; i < N; i++){A[i+j*N] = 1.0*((i+1)+2*(j+1));B[i+j*N] =
1.0/A[i+j*N];}}
cublasInit(); cublasAlloc ( N * N, sizeof(float), (void**)&d_A);
cublasAlloc ( N * N, sizeof(float), (void**)&d_B);cublasAlloc ( N * N, sizeof(float),
(void**)&d_C);
cublasSetMatrix ( N, N, sizeof(float), (void *) A, N, (void *) d_A, N);
cublasSetMatrix ( N, N, sizeof(float), (void *) B, N, (void *) d_B, N);
cudaEventRecord(start, 0); magmablas_sgemm( 'n', 'n', N, N, N, 1.0f, d_A, N, d_B, N, 0.0f, d_C, N
);
cudaEventRecord(stop, 0); cublasGetMatrix ( N, N, sizeof(float), (void *) d_C, N, (void *) C, N
);
cudaEventElapsedTime (&time_seconds,start,stop);
cublasFree (d_A);cublasFree (d_B); cublasFree (d_C); cublasShutdown();
time_seconds=time_seconds/1000; mf=((2.0*N-1)*N*N)/(time_seconds*1000000.0);
printf("time=%.4fsec\nspeed=%0.2fMFlops\n",time_seconds,mf);
printf("i=%d\tj=%d\tC=%.5f\n",N/256,N/128,c[(N/256)+(N/128)*N]);
printf("i=%d\tj=%d\tC=%.5f\n",3*N/4,5*N/16,c[(3*N/4)+(5*N/16)*N]);
printf("i=%d\tj=%d\tC=%.5f\n",N-4,N-2,c[(N-4)+(N-2)*N]); }

```

Последняя программа написаны для чисел с одинарной точностью. Для чисел с двойной точностью необходимо поменять тип данных float на double, а функцию magmablas_sgemm необходимо заменить на magmablas_dgemm. Программа использует библиотеки MAGMA. Для использования CUBLAS необходимо вместо функции magmablas_sgemm ввести в программу функцию cublasSgemm.

В таблице 1 сведены результаты расчетов по представленным выше программам для GPU при двойной точности вычислений. Также представлены результаты и для CPU с использованием библиотек ScaLAPACK и ATLAS по методу, изложенному в работе [5]. Результаты представлены в виде дроби: числитель – время счета в секундах, знаменатель – производительность в Гигафлопсах в секунду. Производительность определялась как отношение числа операций с плавающей точкой при матричном произведении к затраченному времени. Число операций в программах определяется по выражению: $op=N*N(2*N-1)$, где N – число строк или столбцов квадратной матрицы.

Сопоставление данных в табл. 1, 2 с результатами тестовых программ показало их близкое сходство. Производительность процессора соизмерима с производительностью программы для GPU Tesla C2075, написанной с использованием глобальной памяти [7] и примерно в 6,3 раза ниже для GPU Tesla

C2075 для программ с использованием библиотек CUBLAS и MAGMA. В случае компиляции в режиме Tesla family библиотека MAGMA существенно проигрывает по производительности библиотеке CUBLAS. Так для чисел с двойной точностью примерно в 1.8 раза.

Таблица 1

**Результаты расчетов по представленным выше программам
для GPU при двойной точности вычислений**

Mat. NxN	CPU 6 ядер	GPU GeForce GTX 480			GPU Tesla C2075		
		Глоб.	Разд.	cublas	Глоб.	Разд.	cublas
1024	0.062/34.6	0.034/61.9	0.018/122.1	0.014/155.7	0.045/47.3	0.022/96.0	0.008/284.4
2048	0.407/42.2	0.282/60.8	0.140/123.0	0.105/163.0	0.375/45.9	0.178/96.4	0.058/295.8
3072	1.234/47.0	0.919/63.1	0.471/123.1	0.352/164.6	1.233/47.0	0.600/96.7	0.194/299.2
4096	2.870/47.9	2.213/62.1	1.141/120.5	0.835/164.5	2.963/46.4	1.455/94.5	0.458/300.1
5120	5.687/47.2	4.253/63.1	2.181/123.0	1.626/165.1	5.715/47.0	2.781/96.5	0.893/300.5
6144	- / -	7.482/62.0	3.771/123.0	2.810/165.1	10.025/46.3	4.805/96.5	1.543/300.6

Таблица 2

Результаты расчетов для режимов компиляции Fermi family и Tesla family

Матрица NxN	Процессор AMD Phenom II X6 1090T(6 ядер)	GPU Tesla C2075				
		Глобальная память	Компиляция Tesla		Компиляция Fermi	
			CUBLAS	MAGMA	CUBLAS	MAGMA
1024	0,062/34,6	0,045/47,3	0,008/284,4	0,013/170,2	0,008/284,8	0,008/282,4
2048	0,407/42,2	0,375/45,9	0,058/295,9	0,099/173,8	0,058/295,9	0,058/295,2
3072	1,234/47,0	1,233/47,0	0,194/299,3	0,333/174,1	0,194/299,4	0,194/298,9
4096	2,870/47,9	2,963/46,4	0,458/300,3	0,792/173,5	0,458/300,2	0,458/299,9
5120	5,687/47,2	5,715/47,0	0,893/300,6	1,536/174,7	0,893/300,5	0,894/300,2
6144	- / -	10,025/46,3	1,542/300,8	2,654/174,7	1,543/300,6	1,543/300,6

Выводы

1. Процесс установки библиотек MAGMA не является самонастраивающимся. Часто приходится вручную делать корректировки используемых библиотек при компиляции и изменять тексты программ. Поэтому установка библиотек требует достаточной квалификации системного программиста.

2. Библиотеки MAGMA и CUBLAS показали примерно одинаковую производительность для матричного произведения как для чисел с одинарной, так и с двойной точностью. Однако для GPU GeForce GTX 480 резко падает производительность при переходе от чисел с одинарной точности к двойной точности (примерно в 5.1 раза). Для GPU Tesla C2075 падение производительности не превышает 2,1 раза. Таким образом, GPU Tesla C2075 более подходит для решения сложных задач, требующих расчетов с двойной точностью, который также имеет объем глобальной памяти 6 Гбайт (GPU GeForce GTX 480 – 1,5 Гбайт).

3. Производительность GPU GeForce GTX 480 и GPU Tesla C2075 выше производительности CPU AMD Phenom II X6 1090T примерно в 3.5 и 6.3 раз соответственно для чисел с двойной точностью. А производительность GPU GeForce GTX 480 в 1.3 раза выше производительности GPU Tesla C2075 для чисел с одинарной точностью. Поэтому для небольших задач, требующих памяти не более 1.5 Гбайт и расчетов с одинарной точностью целесообразнее использовать GPU GeForce GTX 480 как недорогое и очень эффективное решение.

4. Для достижения максимальной производительности GPU NVIDIA CUDA необходимо обязательно использовать библиотеки MAGMA или CUBLAS, которые дают ускорение рассмотренных расчетов примерно в 6.4 раза по сравнению с использованием глобальной памяти (традиционный способ программирования). Программирование с использованием разделяемой памяти требует высокой квалификации программиста.

5. Преимущество GPU по сравнению с CPU возрастает с размерности матрицы.

6. Производительность GPU при матричном умножении с использованием CUBLAS для GeForce GTX 480 практически равна пиковой производительности при двойной точности вычислений (пиковая – 168.1, полученная 165.1 Гигафлопс). Для GPU Tesla C2075 пиковая производительность почти в два раза выше полученной (пиковая – 515.2, полученная 300.6 Гигафлопс). Это указывает на недостаточную эффективность библиотеки CUBLAS и MAGMA для GPU Tesla

7. Стоимость GPU GeForce GTX 480 примерно в 8 раз меньше стоимости GPU Tesla. Поэтому, исходя из соотношения стоимость – производительность выгоднее использование для небольших расчетов, т.е. требующих памяти до 1.5 Гбайт, GPU GeForce GTX 480. Особенно выгодно его использование для расчетов с одинарной точностью, т.к. GPU GeForce GTX 480 работает в 8.4 раза быстрее CPU AMD Phenom II X6 1090T, а GPU Tesla C2075 лишь в 6.5 раза (это показали расчеты по этим же программам, которые были переписаны для чисел с одинарной точностью).

8. Рассмотренные способы решения задач матричного умножения справедливы для использования в вычислительной системе только одного GPU. Однако неизвестно, насколько эффективно распараллеливание

этой задачи на нескольких установленных GPU в многоядерной системе.

Литература

1. The ScaLAPACK Project. 2017 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.netlib.org>
2. Automatically Tuned Linear Algebra Software (ATLAS). 2016 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://math-atlas.sourceforge.net/>
3. NVIDIA TESLA V100 TENSOR CORE GPU. 2018 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://www.nvidia.com/en-us/data-center/tesla-v100/>
4. Антонов А.С. Параллельное программирование с использованием технологии MPI : учебное пособие / Антонов А.С. – М. : Изд-во МГУ, 2004. – 71 с.
5. Мясичев А.А. Достижение наибольшей производительности перемножения матриц на системах с многоядерными процессорами. Т. 3: Теорія та методика навчання інформатики / Мясичев А.А. – Кривий Ріг : Видавничий відділ НметАУ, 2010. – 303 с.
6. Мясичев О.А. Оцінка продуктивності GPU NVIDIA CUDA при вирішенні задач матричного множення / О.А. Мясичев // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – Хмельницький, 2012. – № 1. – С. 73–79.
7. Параллельные вычисления на GPU. Архитектура и программная модель GPU : учеб. пособие / А.В. Боресков и др. ; предисл.: В.А. Садовничий. – М. : Издательство Московского университета, 2012. – 336 с., илл. – (Серия "Суперкомпьютерное образование").
8. Гергель В.П. Теория и практика параллельных вычислений. 2016 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://www.twirpx.com/file/1978282/>
9. Параллельные вычисления на GPU. Архитектура и программная модель CUDA : учеб. пособие / Боресков А.В., Харламов А.А., Марковский Н.Д. и др. – М. : Издательство Московского университета, 2012. – 336 с.
10. Matrix Algebra on GPU and Multicore Architectures. 2018 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://icl.cs.utk.edu/magma/index.html>
11. CUBLAS (NVIDIA CUDA Basic Linear Algebra Subroutines). 2018 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://developer.nvidia.com/cublas>
12. Установка CUDA Toolkit и драйвера NVIDIA для разработчиков. 2012 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://forum.ubuntu.ru/index.php?topic=114802.0>
13. Мясичев А.А. Вычислительные возможности микроконтроллеров STM32F4/ А.А. Мясичев, С.В. Ленков // Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – Київ, 2016. – Випуск № 51. – С. 185–192.
14. Top 500 the list. 2018 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://www.top500.org/lists/2018/06/>
15. NVIDIA TURING. 2018 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://www.nvidia.com/en-ru/geforce/turing/>
16. Myasishev A.A. Computing capabilities stm32f429i-disco for matrix multiplication / A.A. Myasishev // Materials of the XI International scientific and practical conference. – 2015. – Vol 17. Sheffield. – С. 51–57.
17. Мясичев О.А. Ефективність використання GPU NVIDIA при вирішенні систем лінійних рівнянь / О.А. Мясичев // 36. наук. праць Військового інституту Київського НУ ім. Тараса Шевченка. – К. : ВІКНУ, 2012. – Вип. 38. – С. 76–80.
18. Мясичев А.А. Сопоставление производительностей GPU и CPU для матричного умножения с двойной точностью / А.А. Мясичев // Теорія та методика навчання математики, фізики, інформатики : збірник наукових праць : в 3-х т. Т. 3: Теорія та методика навчання інформатики. – Кривий Ріг : Видавничий відділ НметАУ, 2012. – Випуск X. – С. 99–108.
19. Мясичев А.А. Сопоставление производительностей GPU TESLA C2075, GEFORCE 480 GTX с 6-ядерным CPU AMD при решении систем линейных уравнений / А.А. Мясичев // Материали междунар. НПК «Ключевые проблемы современной науки – 2012». – София : Бял ГРАД-БГ, 2012. – Том 30. – С. 28–40.

References

1. The ScaLAPACK Project. 2017 [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : <http://www.netlib.org>
2. Automatically Tuned Linear Algebra Software (ATLAS). 2016 [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : <http://math-atlas.sourceforge.net/>
3. NVIDIA TESLA V100 TENSOR CORE GPU. 2018 [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : <https://www.nvidia.com/en-us/data-center/tesla-v100/>
4. Antonov A.S. Parallel'noe programmirovaniye s ispol'zovaniem tehnologii MPI : uchebnoye posobie / Antonov A.S. – M. : Izd-vo MGU, 2004. – 71 s.
5. Mjasishhev A.A. Dostizhenie naibol'shej proizvoditel'nosti peremnozheniya matric na sistemah s mnogoyadernymi processorami. T. 3: Teorija ta metodika navchannja informatiki / Mjasishhev A.A. – Krivij Rig : Vidavnicij viddil NmetAU, 2010. – 303 s.
6. Mjasishhev O.A. Ocinka produktivnosti GPU NVIDIA CUDA pri virishenni zadach matrichnogo mnozhenija / O.A. Mjasishhev // Vimirjuval'na ta obchisljuval'na tehnika v tehnologichnih procesah. – Hmel'nic'kij, 2012. – № 1. – S. 73–79.

7. Parallelnye vychislenija na GPU. Arhitektura i programmaja model' GPU : uceb. posobie / A.V. Boreskov i dr. ; predisl.: V.A. Sadovnichij. – M. : Izdatel'stvo Moskovskogo universiteta, 2012. – 336 s., ill. – (Serija "Superkomp'juternoe obrazovanie").
8. Gergel' V.P. Teorija i praktika paralel'nyh vychislenij. 2016 [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : <https://www.twirpx.com/file/1978282/>
9. Parallelnye vychislenija na GPU. Arhitektura i programmaja model' CUDA : uceb. posobie / Boreskov A.V., Harlamov A.A., Markovskij N.D. i dr. – M. : Izdatel'stvo Moskovskogo universiteta, 2012. – 336 s.
10. Matrix Algebra on GPU and Multicore Architectures. 2018 [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : <http://icl.cs.utk.edu/magma/index.html>
11. CUBLAS (NVIDIA CUDA Basic Linear Algebra Subroutines). 2018 [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : <http://developer.nvidia.com/cublas>
12. Ustanovka CUDA Toolkit i drajvera NVIDIA dlja razrabotchikov. 2012 [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : <http://forum.ubuntu.ru/index.php?topic=114802.0>
13. Mjasishhev A.A. Vychislitel'nye vozmozhnosti mikrokontrollerov STM32F4/ A.A. Mjasishhev, S.V. Lenkov // Zbirk naukovih prac' Vijs'kovogo institutu Kiivs'kogo nacional'nogo universitetu imeny Tarasa Shevchenka. – Kiiv, 2016. – Vipusk № 51. – S. 185–192.
14. Top 500 the list. 2018 [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : <https://www.top500.org/lists/2018/06/>
15. NVIDIA TURING. 2018 [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : <https://www.nvidia.com/ru-ru/geforce/turing/>
16. Myasishev A.A. Computing capabilities stm32f429i-disco for matrix multiplication / A.A. Myasishev // Materials of the XI International scientific and practical conference. – 2015. – Vol 17. Sheffild. – S. 51–57.
17. Mjasishhev O.A. Efektivnist' vikoristannja GPU NVIDIA pri virishenni sistem liniynih rivnjan' / O.A. Mjasishhev // Zb. nauk. prac' Vijs'kovogo institutu Kiivs'kogo NU im. Taras Shevchenko. – K. : VIKNU, 2012. – Vip. 38. – S. 76–80.
18. Mjasishhev A.A. Sopostavlenie proizvoditel'nostej GPU i CPU dlja matrichnogo umnozhenija s dvojnoj tochnost'ju / A.A. Mjasishhev // Teorija ta metodika navchannja matematiki, fiziki, informatiki : zbirk naukovih prac' : v 3-h t. T. 3: Teorija ta metodika navchannja informatiki. – Krivij Rig : Vidavnicij viddil NMetAU, 2012. – Vipusk X. – S. 99–108.
19. Mjasishhev A.A. Sopostavlenie proizvoditel'nostej GPU TESLA C2075, GEFORCE 480 GTX s 6-jadernym CPU AMD pri reshenii sistem linejnyh uravnenij / A.A. Mjasishhev // Materialy mezhdunar. NPK «Kljuchevye problemy sovremennoj nauki – 2012». – Sofija : Bjal GRAD-BG, 2012. – Tom 30. – S. 28–40.

Рецензія/Peer review : 2.3.2019 р. Надрукована/Printed :10.4.2019 р.
Стаття рецензована редакційною колегією

Р. В. ХИНЕВИЧ, О. Л. ЯВОРСЬКИЙ
Київський національний університет технологій та дизайну

СИСТЕМАТИЗАЦІЯ КОМП'ЮТЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ОБРОБКИ ФОТОЗОБРАЖЕНЬ

Надано результати дослідження існуючих видів обробки фотозображень. Метою стало проведення аналізу та систематизація методів та технологій пост-обробки фотографій у контексті сучасного фотодизайну. В ході дослідження визначено принципи групування видів обробки фотозображень з використанням сучасних графічних програмних середовищ. На основі проведеного аналізу розроблено класифікацію видів обробки фотозображень. Наведено характеристику сутності та послідовність опрацювання різних видів обробки фотозображень під час підготовки фахівців з фотодизайну.

Ключові слова: обробка фотозображень, фотодизайн, графічні програмні середовища.

R. V. KHYNEVYCH, O. L. YAVORSKIY
Kyiv National University of Technologies and Design

SYSTEM COMPUTER TECHNOLOGIES PHOTO DISCLAIMER PROCESSING

The necessity of systematization of modern methods and technologies of post-processing of photographs as an integral part of the overall design process has been determined. The results of the study of existing types of computer processing of photo images are presented. The paper establishes the principles of grouping methods for digital processing of photographs using modern graphical software environments. Based on the analysis carried out, a classification of photo image processing methods as been developed by the degree of impact on the original image and the complexity of the actions performed. The proposed classification determines the sequence and methods of processing computer technologies within raster and vector digital environments when preparing specialists in photo design. The analysis of the methodology of teaching computer disciplines for students specialization photodesign has been carried out. An integrated approach has been developed that includes a combination of both image correction and image editing technologies and the creation of qualitatively new works of art based on original photographs, as well as the use of photographs or their parts in the development of compositions from components of different origin. The main aspects of the methodology of teaching computer disciplines for designers are identified. The task of studying the relevant courses is to obtain the theoretical foundations and the acquisition of practical skills in the selection and appropriate use of computer technology to solve typical design problems, as well as the methods of creating original specialized technologies for the successful implementation of creative solutions of the designer.

Keywords: computer processing of photographic images, photo design, graphic software environments.

Вступ

Сучасний фахівець з фотодизайну повинен вільно володіти методами та технічними засобами проведення фотозйомки, що необхідно для професійного створення відповідної продукції. Крім цього, обов'язковим в роботі дизайнера є володіння комп'ютерними технологіями для обробки, корекції, стилізації фотозображень та створення художніх творчих робіт.

Підготовка фахівців з фотодизайну передбачає вивчення та отримання практичних навичок з використання найпоширеніших в світі комп'ютерних графічних середовищ та відповідних цифрових технологій підтримки окремих етапів творчого дизайнерського процесу при створенні продуктів рекламно-презентаційного, просвітницького та інформативного характеру.

Експериментальна частина

В результаті дослідження методології вивчення сучасних комп'ютерних технологій цифрової обробки зображень та створення композицій із різних складових було визначено необхідність систематизації існуючих видів обробки фотографій як складової частини загального дизайнерського процесу.

Використання комп'ютерних технологій на окремих етапах розробки дизайнерських продуктів надає великі можливості для реалізації будь-яких творчих планів дизайнера. Обробка фотографій це дуже складний і важливий етап роботи фотодизайнера. Він може перетворити звичайну вихідну фотографію в унікальний витвір мистецтва.

Сьогодні існує велика кількість різноманітних технік та методів обробки фотозображень, більшість з яких можна назвати авторськими, оскільки вони пов'язані з певними школами та курсами з вивчення графічних програмних середовищ [1–3]. Кожен автор створює та розвиває особистий підхід до вивчення відповідних програм, що зумовлено загальним напрямом використання тих чи інших комп'ютерних технологій. Як правило, процеси опрацювання фотозображень у графічних програмних середовищах поділяються за видами робіт – обробка фото, ефекти, графіка, дизайн, анімація тощо або за рівнями обробки – базова та повна.

В той час як цифрові технології розвиваються стрімкими темпами, частина фотохудожників продовжують використовувати деякі застарілі технології для створення якісних художніх фотографій. В зв'язку з цим, з'являються нові методи, за допомогою яких цифровими засобами можна відтворити або імітувати основні характеристики аналогової фотографії, а саме: друк фото на різних видах фотопаперу (художній, гумований, літографський та ін.), використання фільтрів та різних прийомів при фотозйомці тощо [4]. З виникненням та розвитком цифрової фотографії розширюються можливості використання комп'ютерної техніки для створення різноманітних цифрових фотоефектів.

Метою даної роботи є удосконалення методики вивчення графічних програмних середовищ студентами спеціалізації фотодизайн. Для досягнення поставленої цілі були визначені наступні завдання:

- проведення аналізу навчальних програм комп'ютерних дисциплін, що викладаються студентам відповідної спеціалізації;

- визначення напрямків удосконалення навчального процесу;
- систематизація отриманих результатів дослідження;
- формулювання подальших кроків з метою створення єдиного комплексного підходу при підготовці фахівців з фотодизайну.

У даній роботі був проведений аналіз існуючих методів та технологій комп'ютерної обробки фотозображень. Крім цього, були проведені дослідження сутності та послідовності отримання теоретичних знань та практичних навичок з використання сучасних цифрових технологій при створенні дизайнерських продуктів.

В результаті аналізу розроблений підхід, який містить поєднання як технологій коригування та редагування зображень, так і створення якісно нових художніх творів на основі вихідних фотографій, а також використання фотографій чи їх частин при розробці композицій із складових різного походження (фото, графіка, шрифт тощо).

За ступенем впливу на вихідну світліну, а також за складністю дій і операцій, що виконуються, всі види обробки зображень поділено на чотири групи:

Перша група. Внесення незначних змін у фотографію з метою покращення її художньо-естетичних якостей та видалення дефектів: коригування балансу білого; коригування тону, насиченості, яскравості; виправлення геометричних спотворень (вирівнювання лінії горизонту, видалення спотворень перспективи); видалення зайвих об'єктів тощо.

Друга група. Внесення більш глибоких змін з метою створення довершеного зображення або зміни настрою чи характеру фотографії у відповідності з авторським задумом: ретушування, реставрація фотографій, розфарбовування чорно-білих зображень (повністю або частково), перетворення кольорових фотографій у чорно-білі і навпаки [5], тонування зображень з використанням одного або більшої кількості кольорів, авторська корекція кольору (рис. 1).



Рис. 1. Приклад обробки зображення другої групи – ретушування портретної фотографії (до і після обробки)



Рис. 2. Приклад обробки зображення третьої групи – створення портрету у стилі поп-арт

Третя група. Створення творчих художніх творів з використанням фотографій: перетворення фото у рисунок олівцем, аквареллю, маслом та ін.; додавання цифрових фото ефектів; подвійна та мультиекспозиція; стилізація фотографій тощо. На рис. 2 наведено приклад перетворення фотографії у портрет в стилі поп-арт.

Четверта група. Створення композицій в результаті поєднання фотографій з іншими складовими (текст, рисунок та інші графічні елементи): розробка продуктів рекламної презентаційної, просвітницької, інформативного характеру (афіші, плакати, постери тощо). На рис. 3 представлено рекламний плакат, в якому поєднано фотографію з текстовою інформацією та графічними елементами – логотипи, емблеми і т.ін. В цій групі видів обробки зображень передбачається використання комп'ютерних програм растрової та векторної графіки.

В результаті проведених досліджень було визначено основні аспекти методики викладання комп'ютерних дисциплін для студентів спеціалізації фотодизайн. Завданням вивчення відповідних курсів є отримання теоретичних основ та набуття практичних навичок у виборі та доцільному використанні комп'ютерних технологій для вирішення типових дизайнерських задач, а також методів створення авторських спеціалізованих технологій для успішного втілення креативних рішень дизайнера.



Рис. 3. Рекламний плакат

Висновки

На основі аналізу сучасних видів обробки фотозображень було встановлено принципи їх систематизації. Запропонована класифікація визначає послідовність та методику опрацювання комп'ютерних технологій у межах растрових та векторних цифрових середовищ при підготовці фахівців з фотодизайну.

Подальші дослідження будуть направлені на удосконалення комплексного підходу до процесу наскрізної підготовки фахівців спеціалізації фотодизайн з врахуванням міждисциплінарних зв'язків і змісту навчальної та виробничої практик.

Література

1. Технология работы с графическим редактором Photoshop [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://photoshopdk.narod.ru/p41aa1.html>.
2. Соловйов В. Комп'ютерні технології в дизайні: навчальний посібник / В. Соловйов. – К. : КНУТД, 2008. – 68 с.
3. Попов Е. Уроки Photoshop (статті и видео уроки по фотошопу) [Електронний ресурс] / Е. Попов, З. Лукьянова – Режим доступу : <https://photoshop-master.ru/lessons/>.
4. Фрост Л. Цифровая фотография / Ли Фрост. – М. : Арт-родник, 2006. – 160 с.
5. Colorize Photos [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://demos.algorithmia.com/colorize-photos/>

References

1. Tehnologija raboty s graficheskim redaktorom Photoshop [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu : <http://photoshopdk.narod.ru/p41aa1.html>.
2. Soloviov V. Kompiuterni tekhnolohii v dizajni: navchalnyi posibnyk / V. Soloviov. – K. : KNUVD, 2008. – 68 s.
3. Popov E. Uroki Photoshop (stat'i i video uroki po fotoshopu) [Elektronnij resurs] / E. Popov, Z. Luk'janova – Rezhim dostupu : <https://photoshop-master.ru/lessons/>.
4. Frost L. Cifrovaja fotografija / Li Frost. – M. : Art-rodnik, 2006. – 160 s.
5. Colorize Photos [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu : <https://demos.algorithmia.com/colorize-photos/>

Рецензія/Peer review : 17.2.2019 р.

Надрукована/Printed : 15.4.2019 р.

Рецензент: д. т. н., проф. Пашкевич К. Л.

МЕРЕЖНИЙ МЕТОД ВИЯВЛЕННЯ ФАЙЛОВОГО ЗЛОВМИСНОГО ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ В КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМАХ ЛОКАЛЬНИХ МЕРЕЖ

В роботі розроблено мережний метод виявлення файлового зловмисного програмного забезпечення. Він базується на двох методах, які здійснюють побудову поведінкової сигнатури та її подальший аналіз на наявність файлового зловмисного програмного забезпечення і розбиття на блоки виконуваної програми та дослідження її на наявність поліморфного та метаморфного коду вірусу. Мережний метод є основою для організації функціонування програмних модулів розподіленої багаторівневої системи і дозволяє організувати її роботу та її компонент, зокрема здійснювати вилучення ймовірно інфікованих програмних модулів з розподіленої багаторівневої системи, встановлення відношення до файлового зловмисного програмного забезпечення на основі обміну і обробки знань, сканування виконуваних файлів створенням для них окремих процесів. Для здійснення детальнішого аналізу програмного коду на основі мережного методу до процесу виявлення залучаються інші програмні модулі.

Ключові слова: зловмисне програмне забезпечення, розподілені системи, комп'ютерні системи, локальна комп'ютерна мережа, мережний метод, поліморфний вірус, метаморфний вірус.

O. S. SAVENKO

Khmelnytsky National University

NETWORK METHOD OF DETECTION OF COMPUTER VIRUSES IN THE LOCAL NETWORK

The network malware detection method is developed in this work. It is based on two methods for constructing a behavioral signature and its subsequent analysis of the existence of file malware and breaking down the blocks of the executable program and examining it for the presence of a polymorphic and metamorphic virus code. The network method is the basis for organizing the functioning of the distributed module multi-level system software modules and allows it to organize its work and its component, in particular, to seize potentially infected software modules from a distributed multi-level system, to establish a relation to file malware based on the exchange and processing of knowledge, scan executable files creating separate processes for them. To implement a more detailed analysis of the code based on the network method to the detection process involved other software modules. The developed methods for detecting malicious software exploits behavioral signatures, and a representation of behavioral signatures is used to represent them in the RBS, which is pre-filled with sample types of file malware. Behavioral signatures are formed on the basis of incidence distribution and malicious file malware matrices, which are specified by the functions of API functions calls.

Keywords: Malware, Distributed Systems, Computer Systems, Local Computer Network, Network Method, Polymorphic Virus, Metamorphic Virus.

Вступ. Постановка задачі

Використання зловмисного програмного забезпечення (ЗПЗ) щоденно зростає, створюючи при цьому проблеми користувачам комп'ютерних систем (КС). Новими сферами його застосування для отримання вигоди і переваг, враховуючи попередню фінансову, стали військова і політична. Військові доктрини багатьох країн світу включають розвиток військових кіберпідрозділів, які розвивають і використовують ЗПЗ для нанесення матеріальної шкоди інфраструктурі інших країн. Застосування руйнівних технологій ЗПЗ дозволяє здійснювати віддалені атаки, не потребуючи перебування поряд з об'єктом атаки [1–3]. Особливої уваги заслуговує захист від таких атак підприємств і організацій реального сектору економіки, атаки на які протягом останніх років суттєво зросли і завдають їм значних збитків. Проведення успішних атак в різних секторах країни може паралізувати на тривалий час її основну інфраструктуру та фінансовий сектор. Крім того, поява нових фінансових інструментів, зокрема альтернативних валют, мотивує зловмисників до подальшого технологічного розвитку ЗПЗ для отримання вигоди. При цьому вони починають залучати обчислювальні потужності не тільки власні, а і інших користувачів, комп'ютерні системи яких приєднані до глобальної мережі. Тому, проблема виявлення ЗПЗ для організацій та підприємств залишається актуальною.

Тенденції розвитку технологій створення і поширення зловмисного програмного забезпечення демонструють активне розширення технічних можливостей таких засобів. Сучасне зловмисне програмне забезпечення представляє собою складні багатофункційні програмні системи та комплекси, які побудовані з використанням ефективних методів створення програмних засобів та методів поширення зловмисного коду.

Виявлення зловмисного програмного забезпечення здійснюється за допомогою різноманітних засобів. Ефективність та достовірність виявлення суттєво залежать, зокрема, і від архітектури таких засобів, а також їх позиціонування та місця розміщення в комп'ютерних системах, зокрема і локальних мережах. Дослідження відомих антивірусних методів та засобів вказують, що реалізація нових принципів, моделей та методів виявлення конкретних типів зловмисного програмного забезпечення шляхом створення відповідних систем потребує подальшого розвитку. Перспективним напрямом досліджень є створення розподілених систем виявлення ЗПЗ [4] для використання в локальних мережах організацій та підприємств. Такі засоби виявлення мають розподілену архітектуру і тоді підвищення достовірності виявлення ЗПЗ можливе за

рахунок залучення груп КС локальної мережі. Важливим критерієм ефективності таких розподілених систем виявлення є наявність в них реалізованих методів, що дозволяють здійснювати виявлення нового ЗПЗ.

В сучасних системах виявлення ЗПЗ застосовуються методи та засоби, що використовують знання про його функціонування та поведінку, які представляються поведінковими сигнатурами. Дослідження функціонування ЗПЗ в різних КС локальної мережі розподіленими системами виявлення дає змогу здійснити порівняння отриманих поведінкових сигнатур ЗПЗ з різними КС з метою його виявлення. Важливим при цьому є вибір архітектури таких розподілених систем, яка дозволить ефективно організувати процес виявлення в локальній мережі в порівнянні з виявленням в окремій КС.

Розглянемо файлове зловмисне програмне забезпечення, яке характеризується тим, що його поширення першочергово має відбуватись в окремій комп'ютерній системі. Файлове ЗПЗ, що міститься у файлах виконуваних програм, після запуску виконуваних програм отримує можливість для пошуку програмних файлів для подальшого свого поширення, для виконання деструктивних дій та отримання контролю над КС з метою приховування своєї присутності. Переміщення файлового ЗПЗ в інші КС мережі може бути здійснено переважно користувачами через порушення політик безпеки. Наявність однакового за функціоналом файлового ЗПЗ в різних КС локальної мережі організації чи підприємства потребує для його виявлення наявності таких методів його виявлення, які б дозволяли враховувати результати моніторингу і сканування різних КС локальної мережі і приймати рішення про наявність ЗПЗ. Тому, перспективною задачею є розробка методів виявлення файлового ЗПЗ з врахуванням особливостей їх використання саме в розподілених системах.

Попередні роботи

Фахівцями з розробки методів виявлення ЗПЗ розроблено системи виявлення, в яких реалізовано виконання відповідних методів.

В роботі [5] запропоновано систему виявлення кібератак на основі залучення нейромережних імунних детекторів. Розроблена система складається з двох частин. Перша реалізована апаратно й працює постійно в режимі реального часу. Друга частина представлена програмним забезпеченням на виділеному комп'ютері, який використовується для аналізу поточних атак та створення відповідних засобів захисту. Прийняття рішення про можливий вплив ЗПЗ здійснюється із залученням системи нейромережних детекторів, в основу якої закладено алгоритм Мамдані.

В роботі [6] представлено інтелектуальну адаптивну систему виявлення ЗПЗ на основі інтеграції штучних імунних систем та штучних нейронних мереж. Така система працює за основними принципами штучної імунної системи, де імунні детектори представляють нейронну мережу і виявляють зловмисний шаблон за допомогою аналізу структури виконуваного коду. Запропонована система володіє функціями самоадаптивності та самонавчання та дозволяє здійснювати виявлення як відомих, так і нових видів ЗПЗ.

Авторами роботи [7] запропоновано систему ідентифікації та класифікації для мережних кібератак. Для реалізації системи запропоновано використання комбінація різних методів штучного машинного навчання, а саме нейронних мереж, імунної системи, нейрофізичних класифікаторів та метод опорних векторів. Відмінною особливістю запропонованої системи є багаторівневий аналіз мережевого трафіку, що дає можливість виявляти атаки методом підпису та комбінувати набір адаптивних детекторів на основі методів машинного навчання.

У роботі [8] запропоновано гібридну систему виявлення рідковживаних кібератак на основі використання штучних імунних систем та нечіткої кластеризації (FC-ANN). Спочатку FC-ANN розподіляє навчальні дані на декілька підгруп з використанням методів нечіткої кластеризації. Для отримання остаточних результатів, визначається оцінка для кожного елементу з сформованих підгруп та виконується їх поєднання з використанням штучної імунної системи.

Проведений аналіз показав, що для виявлення ЗПЗ відомі системи, представлені в [5–8] та інші, здійснюють аналіз мережного трафіку, файлів аудиту, пакетів, що передаються по мережі, перевіряють конфігурацію відкритих мережесервісів, сканують файли виконуваних програм, перевіряють завантажувальний сектор жорсткого диску, сканують оперативний запам'ятовуючий пристрій, здійснюють динамічне трасування процесів. Для встановлення факту порушення роботи КС, відомі системи використовуються різні методи машинного навчання, а саме нейронні мережі, штучні імунні системи, метод опорних векторів, Байєсові мережі, нечітку кластеризацію. Проте, основним недоліком представлених систем є переважно їх хост-орієнтований підхід до виявлення ЗПЗ.

Для того, щоб ефективно застосовувати методи та засоби виявлення зловмисного програмного забезпечення необхідно розробити метод, виконання якого б враховувало мережний підхід.

Основна частина

Розроблена розподілена багаторівнева система (РБС) виявлення ЗПЗ, яка представлена в [4], дозволяє здійснювати виявлення ЗПЗ, як мережного так і файлового. Для виявлення файлового ЗПЗ розроблено методи, використання яких можливе в окремих КС і які реалізовано в РБС. Для використання цих методів в локальній мережі розроблено мережний метод виявлення файлового ЗПЗ, який інтегрує розроблені методи та використовує організацію розподіленої системи для підвищення достовірності виявлення.

Мережний метод виявлення файлового ЗПЗ в комп'ютерних системах локальних мереж базується на основі здійснення узгодження програмних модулів РБС при прийнятті рішення та використанні

розроблених методів виявлення файлового ЗПЗ і складається з таких основних кроків:

1. Здійснення сканування виконуваних файлів із створенням окремих процесів для кожного досліджуваного виконуваного файлу. Всі процеси створюються запуском одного компоненту програмного модуля (ПМ) в КС, який на основі закладеного функціоналу для сканування приймає рішення про потребу застосування методів виявлення.

2. Здійснення збору даних моніторингу після виявлення певних ймовірно зловмисних проявів в КС у вектор.

3. Формування вектору ознак ймовірно підозрілих дій для зібраних даних, компонентами якого є API функції.

4. Застосування методу [9] виявлення файлового зловмисного програмного забезпечення на основі динамічного формування поведінкової сигнатури шляхом відстеження викликів API функцій.

5. Прийняття рішення про місце обробки вектору ймовірно зловмисних дій.

6. Якщо аналіз завантаженості ресурсів КС показав невеликий відсоток завантаженості, тоді здійснити обробку в цій КС, інакше надіслати в іншу визначену ПМ КС.

7. Аналіз результатів кроку 6.

7.1. Якщо встановлено віднесення такого вектору до файлового ЗПЗ, тоді застосування методу виявлення файлового ЗПЗ на основі аналізу функцій обфускації [10] для перевірки на наявність поліморфного та метаморфного вірусу.

7.2. Якщо перевірка встановила, що досліджуваний вектор не містить зловмисного навантаження, тоді здійснити зупинку дослідження процесу, на основі якого він був сформований.

7.3. Якщо встановлено, що досліджуваний вектор містить зловмисне навантаження, тоді здійснити зупинку відповідного процесу та почати дослідження файлів з таким же іменем в інших КС.

7.4. Здійснення пошуку і дослідження на основі отриманих відомостей аналогічних файлів в інших КС мережі, де встановлена РБС її програмними модулями. Сканування файлів в одній КС викликає такі ж сканування в інших ПМ, оскільки однакові файли, якщо це організація чи підприємство, міститимуться в різних КС. Тоді, якщо це так, то здійснювати порівняння їх поведінкових сигнатур.

8. Обробка варіантів подій із залученням решти ПМ РБС. На основі варіантів подій з табл. 1 виокремлення варіантів, в яких можливе відключення зловмисним програмним забезпеченням ПМ РБС, і встановлення такої події для оцінки іншими компонентами РБС. В цьому випадку здійснення вилучення ПМ з РБС.

8.1. Для варіантів 1-256 задіяти стратегію 1 на основі прийняття рішення рештою ПМ та здійснити вилучення ПМ з РБС.

8.2. Для варіантів 257-320 задіяти стратегію 2 на основі прийняття рішення рештою ПМ РБС.

8.3. Для варіантів 321-340 задіяти стратегію 3 на основі прийняття рішення рештою ПМ.

8.4. Для варіантів 341-484 задіяти стратегію 4 на основі прийняття рішення всіма ПМ з РБС та обміну інформацією між ПМ.

8.5. Для варіантів 485-502 задіяти стратегію 5 на основі прийняття рішення всіма ПМ з РБС та обміну інформацією між ПМ.

8.6. Для варіантів 503-512 задіяти стратегію 6 на основі прийняття рішення ПМ та обміну інформацією з рештою ПМ РБС.

9. Обчислення значення ймовірностей в станах ПМ і вимога для інших ПМ здійснити обчислення ймовірності бути ураженою для всієї РБС. Цей крок здійснюється позапланово через дослідження наявного зловмисного прояву в одній з КС.

10. Здійснення оптимізації вектору, що додається в базу зловмисних дій та атак, за генетичним алгоритмом.

11. Формування ймовірностей перебування в станах для надсилання іншим ПМ для визначення стану РБС.

Таким чином, згідно розробленого мережного методу виявлення файлового ЗПЗ програмні модулі РБС дозволяють здійснити вилучення ймовірно уражених ПМ з РБС, встановлення відношення до файлового ЗПЗ на основі обміну і обробки знань, сканування виконуваних файлів створенням для них окремих процесів. ПМ на основі такого мережного методу виявлення файлового ЗПЗ приймають рішення про зміну структури РБС та визначають уражену КС. Завдяки використанню РБС між її ПМ здійснюється обмін інформацією про зловмисні процеси в КС для додаткової перевірки та динамічно залучаються обчислювальні ресурси інших КС для виконання певних завдань інших компонентів системи. Це дозволяє оперативно виконувати задачі виявлення зловмисного програмного забезпечення. РБС надає можливість аналізувати додатково відмічені процеси та здійснювати виявлення ЗПЗ в тих КС локальної мережі, в яких воно не було виявлено в процесі дослідження або було пропущено, за рахунок інформації про зловмисний процес з іншої КС.

Для виконання кроку 8 проаналізуємо можливі варіанти подій в КС за присутності в ньому ПМ РБС та ЗПЗ. На основі їх дослідження визначимо стратегії поведінки ПМ в процесі появи таких подій. Розгляд можливих варіантів проведемо з врахуванням можливої наявності, також, мережного ЗПЗ, зокрема бот-мереж. Це необхідно враховувати, щоб здійснювати обробку повної множини варіантів для введених подій.

Фрагмент можливих стратегій для подій в КС локальної мережі

№ з/п	Встановлення в КС до (1)/після(0) встановлення ПМ або ПЗ вузла бот-мережі (Б)		Стартовий контроль в КС: так(1) / ні(1)		Атака з цієї КС: так(1) / ні(1)	Атака з цієї КС на КС цієї ж мережі: так(1) / ні(1)	Атака на КС: так(1) / ні(1)	Атака з КС цієї ж мережі: так(1) / ні(1)	Наявність файлового ЗПЗ, встановленого до(1) / після(0) встановлення ПМ	Стратегії
	ПМ	Б	ПМ	Б						
1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1
2	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1
...
512	0	0	0	1	0	0	0	0	0	6

Розглянемо випадок, коли в КС вже створено вузол бот-мережі, тобто завантажено зловмісне програмне забезпечення вузла бот-мережі, отримано контроль над певним програмним забезпеченням КС. Якщо вузол бот-мережі міститься в КС, тоді при її запуску стартове зловмісне навантаження повинно проявити себе в одному з процесів, які створюються прописаними виконуваними програмами в файлах автозапуску. Інакше, воно не зможе активуватись в КС при кожному її ввімкненні і, як наслідок, буде вилучено з часом з бот-мережі. Або воно очікуватиме запуску користувачем певних програм чи програми, що теж може відбутись або не відбутись. Тому, висуваємо гіпотезу, що запуск програмного забезпечення вузла бот-мережі здійснюється після ввімкнення КС. В процесі отримання контролю над КС бот-мережа чи на перших етапах свого функціонування вузол бот-мережі здійснить призупинення роботи відомих антивірусних засобів та перейде в режим їх імітації їх роботи.

Варіантів встановлення ПМ РБС може бути два: 1) під час нового встановлення програмного забезпечення КС встановлюється програмне забезпечення ПМ; 2) програмне забезпечення ПМ встановлюється у вже функціонуючу КС. При першому варіанті КС може бути новою і тому потребує встановлення ПЗ або вже використовуваною раніше і потребує повного переустановлення ПЗ. Але навіть, якщо вона є новою, то як правило містить операційну систему і до включення її до складу локальної мережі вже міститиме певне визначене ПЗ. Таким чином, вірогідність отримати зловмісний програмне забезпечення при першому варіанті дуже мала, але теоретично можлива. При другому варіанті ймовірність наявності ЗПЗ в КС більша, ніж в першому.

Якщо припустити, що ЗПЗ в першому варіанті не було, тоді ПМ РБС встановлюється першою і отримує доступ для контролю над всією КС. Цей контроль передбачає основні такі дії: запуск першою, звірку виконуваних програм з файлу автозапуску, розміщення резидентної програми в пам'яті, моніторинг АРІ викликів і збір їх у вектори. Програмне забезпечення вузла бот-мережі може потрапити в КС двома способами: користувач, мережа. Тоді, таке ЗПЗ буде обов'язково пробувати прописати себе для можливості активації при наступному ввімкненні КС, створити можливості для розміщення своєї резидентної частини в пам'яті. При спробі прописатись в ПМ РБС буде виявлено через здійснення самоконтролю при запуску, який закладено в функціонал ПМ, якщо ЗПЗ допустить запуск наступних після нього команд. Якщо ж ЗПЗ не допустить запуск команд ПМ, тоді він не відзвітується перед рештою ПМ РБС і буде ними вилучений з РБС, що дозволить блокувати таку КС. При другому варіанті якщо ЗПЗ не було, а з'явилось, тоді та ж стратегія, що і для першого розглянутого варіанту. А якщо ЗПЗ вже було, тоді в процесі функціонування КС виникне конфлікт між зловмісним програмним забезпеченням вузла бот-мережі і ПМ, суть якого полягатиме в змаганні за перший запуск та доступ до оперативної пам'яті, облік для ПМ і блокування відомих АЗ. Певний час вони можуть функціонувати. В будь-якому з варіантів ПМ виступить як об'єкт для атаки в якості приманки. Але не все ЗПЗ, а особливо бот-мережі, розроблено на основі стратегії змагання за повний контроль над КС чи перший запуск. Для приховування своєї присутності стратегія перебування в КС може передбачати, наприклад, тільки прописування в одному з файлів, які містяться у файлі автозапуску. Тоді, виявити таке ЗПЗ можна лише за його проявами, важливих з яких для вузла бот-мережі, є необхідність підтримки зв'язку з своїм контролюючим центром. Тобто, для цього випадку вузол бот-мережі не проявляє активності, а очікує команди і потім запускає повний пакет програмного забезпечення необхідний для її виконання. Така стратегія дозволяє перебувати в КС тривалий час без виявлення. Але її та інші стратегії, закладені в механізм функціонування бот-мережі, можуть порушити інші події, які викликані сторонніми проявами. Наприклад, розглянемо перший варіант подій з табл.1, тобто коли отримано команду здійснити атаку на іншу КС чи ресурс, а в цей час подібна атака відбувається на цю ж КС. Така подія може відбуватись тільки лише коли атака на КС ведеться не з цієї ж бот-мережі, вузол якої міститься в КС, а іншим зловмісним програмним забезпеченням. В цьому випадку ПМ РБС переходить до стану 7 [4], який активується через надмірне звернення до портів та викликом функцій орієнтованих на встановлення мережних з'єднань. ПМ визначає IP адресу, куди націлена інтенсивна відправка пакетів і здійснює збільшення інтервалу надсилання пакетів через блокування відповідних пакетів. Проведення атаки на цю ж

КС, яка є в локальній мережі, тому не може містити ресурсів для атаки, може здійснюватись тільки іншим злоумисником для встановлення контролю над нею. Ця атака може відбуватись з іншої КС цієї ж мережі, тоді ПМ встановлює КС, про яку повідомляє решті ПМ РБС для здійснення її дослідження, або з-за меж локальної мережі. В будь-якому з випадків відбивання атаки здійснюватиметься відповідними засобами. Але частина атакуючих дій може бути успішною, тоді в КС будуть одночасно присутні ПМ, ПЗ вузла бот-мережі та нове ЗПЗ. При їх функціонуванні виникне конфлікт, який проявиться в спробі здійснення контролю над КС, що буде впливати на її нормальний порядок функціонування. В цьому випадку ПМ при звірці інформації про розміщені в КС файли виявить поточні зміни і почне дослідження підозрілих файлів.

У другому варіанті подій якщо в КС міститься вузол бот-мережі і з неї здійснюється атака, тоді ПМ порівнює зростаючу інтенсивність викликів мережних з'єднань та здійснює їх затримки методом призупинення та виявляє процес, який їх генерує. Цей варіант можливий при повному контролі ПМ в КС і другорядній ролі вузла бот-мережі, якщо ж інакше, то тоді вузол бот-мережі змагався б за ресурси КС з ПМ і цим виявив би себе.

В третьому варіанті подій розглядаємо можливість проникнення в КС з малою ймовірністю. При цьому ПМ аналізуватиме інтенсивність звернення до портів та надходження пакетів, а також подальшого розміщення файлів, що надійшли і фіксування місця їх розміщення. В подальшому ПМ розміщує такі файли в свій реєстр для спостереження за ними протягом певного часу.

В четвертому варіанті подій ПМ здійснює змагання за ресурси з ПЗ вузла бот-мережі. І аналогічно, як у першому варіанті, може бути дві варіації: ПЗ вузла бот-мережі прагнучиме встановити повний контроль над КС або згідно своєї стратегії функціонування приховуватиме свою присутність до отримання команди на проведення атаки.

П'ятий варіант подій включає результати першого з врахуванням того, що додатково наявне в КС файлове ЗПЗ. Його присутність ускладнюватиме функціонування КС, бо воно перебуватиме в оперативній пам'яті, здійснюватиме своє поширення шукаючи об'єкти для втілення. Характерною особливістю в цьому варіанті буде завантаженість ресурсів і сповільнення роботи КС. ПМ відмічатиме зміни в файлах, які прописані в її реєстрі для цієї КС. Основним місцем, де зіткнуться ПМ, ПЗ вузла бот-мережі та файлове ЗПЗ буде оперативна пам'ять. Атака на цю КС підсилюватиме ускладнення роботи КС, що аналогічно до першого варіанту призведе до тривалої обробки результатів моніторингу ПМ в КС і повідомлення про події іншим ПМ РБС.

Аналогічно будуються інші стратегії розвитку подій для варіантів, коли не передбачається наявність ПЗ вузла бот-мережі, тобто при наявності лише файлового ЗПЗ.

Стратегії ПМ в різних варіантах подій:

- 1) КС контролюється бот-мережею, ПМ в КС заблоковано вузлом бот-мережі, КС виконує поставлені користувачем задачі;
- 2) КС контролюється бот-мережею, ПМ в КС заблоковано вузлом бот-мережі, КС функціонує з тривалими перебоями та затримками у виконанні запитів користувача;
- 3) КС контролюється бот-мережею, ПМ в КС заблоковано вузлом бот-мережі, КС функціонує з тривалими перебоями та затримками у виконанні запитів користувача, файлове ЗПЗ в КС здійснює своє поширення;
- 4) КС контролюється ПМ, вузол бот-мережі в КС досліджується ПМ, КС виконує поставлені користувачем задачі;
- 5) КС контролюється ПМ, вузол бот-мережі та файлове ЗПЗ в КС досліджуються ПМ, КС виконує поставлені користувачем задачі;
- 6) КС контролюється ПМ, який здійснює моніторинг і обробку подій.

Проаналізуємо логіку взаємодії програмного модуля РБС та ПЗ вузла бот-мережі в КС для отримання стратегій. Задамо стадії функціонування варіантів подій та можливих стратегій їх розвитку часовою діаграмою та виділимо в ній повторювані фрагменти для здійснення оптимізації при прийнятті рішення ПМ РБС. Шаплони можливих варіантів подій в КС та їх варіації формують одну з шести стратегій. Стратегії для подій в КС локальної мережі представлено в табл.1.

Ймовірності в станах ПМ РБС залежать від варіантів подій, які відбуватимуться в КС, пов'язаних з присутністю ЗПЗ, та визначаються за формулами 1:

$$P_{1,j} = \begin{cases} 0, \text{ ПМ знаходиться тільки в стані 1 або стані 1 і 8 одночасно} \\ \frac{s}{100}, \text{ ПМ перейшов до стану } s \text{ і продовжує бути в стані 1} \end{cases}, \quad (1)$$

$$P_{s,j} = \frac{\sum_{c=1}^7 P_{s,j,c}}{7 * s},$$

де j - й програмний модуль РБС, s - номер стану (для станів 2-7).

Для подій, коли декілька станів одночасно працюють розрахунок проводиться з врахуванням виконання умов.

Розроблений мережний метод виявлення файлового ЗПЗ базується на двох методах, представлених

детальніше в [9, 10], які здійснюють побудову поведінкової сигнатури та її подальший аналіз на наявність файлового ЗПЗ і розбиття на блоки виконуваної програми та дослідження її на наявність поліморфного та метаморфного вірусу. Отримання результату підвищення достовірності виявлення згідно мережного методу досягається залученням до процесу програмних модулів РБС, що дозволяє здійснювати детальніший аналіз програмного коду.

Експерименти

Для порівняння розроблених методів і РБС [4] було проведено експеримент в КС локальної мережі для перевірки достовірності виявлення мережним методом файлового ЗПЗ. Результати роботи системи було збережено у файли-журнали.

Для визначення ефективності розробленої системи було проведено ряд експериментів. Для цього було залучено мережу, що складалась з 20 комп'ютерних систем. Кожна комп'ютерна система була обладнана віртуальним середовищем на основі Qemu, яке задіявалось ПМ розробленої системи для дослідження поведінок ймовірно зловмисних програм і отримання викликів API функцій. Дослідження виконуваних програм здійснювалось на трьох етапах їх функціонування: потрапляння в КС, активізації та виконання закладених функцій. Кожен ПМ використовував базу поведінкових моделей файлового ЗПЗ на її різних етапах функціонування. Для розрахунку достовірності виявлення файлового ЗПЗ був проведений наступний експеримент з різними типами файлового ЗПЗ: файлові віруси, поліморфні віруси, метаморфні віруси, троянські програми. Було згенеровано 600 програмних об'єктів з функціональним навантаженням чотирьох розглядуваних типів файлового ЗПЗ по 150 кожного. Для отримання тестових зразків поліморфних та метаморфних вірусів було використано генератори NGVCK, PS-MPC, VCL32 та G2. Всі метаморфні варіації вірусів, які створювались за допомогою цих генераторів були скомпільовані з опціями anti-debugging та anti-emulation. Кожна із згенерованих варіацій метаморфних вірусів застосовувала основні техніки заплутування коду: вставку сміттєвих команд, використання еквівалентних інструкцій та перемішування блоків інструкцій.

Сигнатури згенерованих вірусів відсутні в базах сигнатур АПЗ та розробленої системи. Всі програмні об'єкти було поділено на групи для задання способу їх потрапляння в КС, щоб врахувати усі можливі шляхи проникнення в КС:

- 1) програмні об'єкти скопійовані на жорсткий диск кожної КС;
- 2) програмні об'єкти завантажені на флеш-носії і підключені до кожної КС;
- 3) програмні об'єкти завантажені на попередньо створений web-сайт;
- 4) програмні об'єкти архівовані та відправлені на попередньо створені електронні адреси;
- 5) програмні об'єкти завантажені на попередньо створений ftp-сервери всіх КС.

Запуск на виконання згенерованих програмних об'єктів був здійснений спеціальною програмою, яка встановлена в кожену КС і запустила по одному програмному об'єкту із ЗПЗ в кожній КС одночасно. Потім все розпочиналось знову і вибирався інший програмний об'єкт. Запуск корисних програм в усіх КС не виконувався. Після ввімкнення всіх КС завантажилась ОС та всі програми, які потрібні прописані для автоматичного запуску. Всі КС містили однакове апаратне та програмне забезпечення.

Результати проведеного експерименту та оцінки достовірності виявлення ЗПЗ розподіленою системою Distributed Multilevel System [11], в якій реалізовано методи, представлено в табл. 2. Крім того, за результатами проведеного експерименту було також встановлено кількість ПМ, які залучались для дослідження протягом всього експерименту, та кількість ПМ, які були заблоковані рештою ПМ розробленої системи, під час виявлення. Це підтверджує застосування решти компонент розподіленої системи в процесі виявлення ЗПЗ окремим ПМ.

Таблиця 2

Результати експерименту для файлового ЗПЗ

Програмні об'єкти з наявним в них ЗПЗ	Кількість програм, виявлених як підозрілі	Відсоток виявлення, %	Кількість ПМ, які залучались для дослідження протягом всього експерименту	Кількість ПМ, які були заблоковані рештою ПМ розробленої системи, під час виявлення
Файлові віруси	150	97,3%	0	2
Поліморфні віруси	150	89,3%	57	7
Метаморфні віруси	150	92,3%	24	3
Троянські програми	150	85,3%	2	5
Всього	600	90,9	20,75	5,7

Для проведення порівняльного аналізу було обрано наступні відомі антивірусні засоби: ESET Smart Security (версія 10.1.204.0), Avast (версія 17.5.2303), Comodo Antivirus (версія 8.2.0.4674), Kaspersky (версія 17.0.0.61), McAfee Internet Security (версія 10.1.0), Dr.Web (версія 11.0), Microsoft Security Essentials (версія 4.11.15063.446), Avira Antivirus (версія 10.0). Результати роботи розробленої розподіленої системи Distributed Multilevel System виявлення ЗПЗ представлено діаграмою на рис. 1.

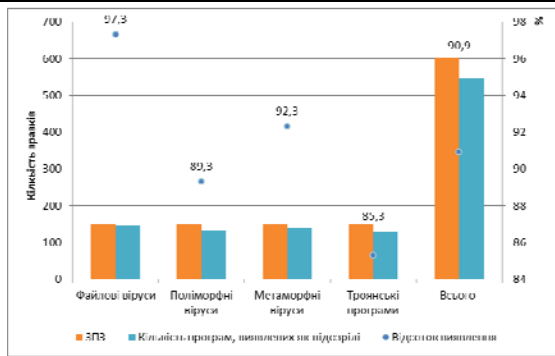


Рис. 1. Результати експерименту

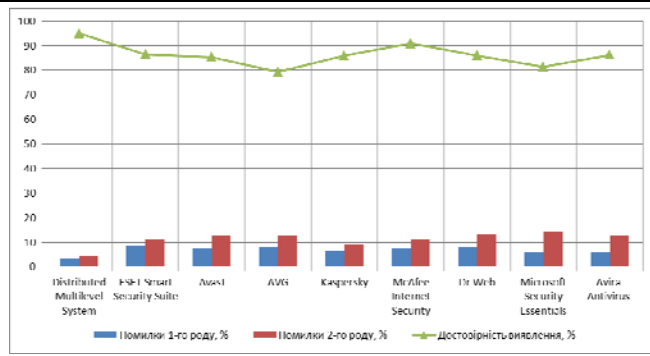


Рис. 2. Порівняльний аналіз розробленої системи Distributed Multilevel System з існуючими АВЗ (достовірність виявлення, %)

Порівняльний аналіз розробленої системи Distributed Multilevel System з існуючими АВЗ стосовно помилок першого роду (хибні спрацювання) та помилок другого роду (хибно-негативні результати) зображено діаграмою на рис. 2 та рис. 3.

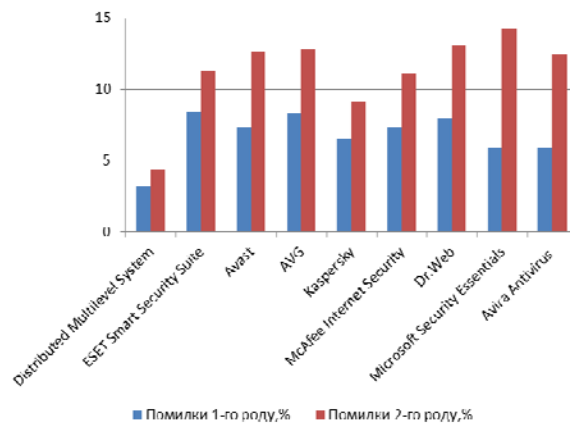


Рис. 3. Порівняльний аналіз розробленої системи Distributed Multilevel System з існуючими АВЗ: помилки першого роду (хибні спрацювання), %, та помилки другого роду (хибно-негативні результати), %

Результати експериментальних досліджень з використанням розробленої системи Distributed Multilevel System підтверджують вірність наукових положень розроблених методів та ефективність архітектури розподіленої багаторівневої системи, оскільки її впровадження підвищує достовірність виявлення на 5-12% в мережному представленні в порівнянні з хостовим, та на 2-4% у порівнянні з існуючими мережними АВЗ виявлення файлового ЗПЗ.

Таким чином, результати використання розробленої РБС Distributed Multilevel System та її підсистем на основі розробленого мережного методу для виявлення певних типів файлового ЗПЗ в КС локальних мереж є достатніми в порівнянні з аналогічними мережними АВЗ і підтверджують ефективність запропонованих теоретичних моделей та розроблених методів.

Висновки

Розроблені методи виявлення файлового ЗПЗ використовують поведінкові сигнатури і для їх представлення в РБС використовується база поведінкових сигнатур, яка попередньо наповнена зразками типів ЗПЗ. Поведінкові сигнатури формуються на основі матриць інцидентності поширення та деструктивних дій файлового ЗПЗ, які уточнюються послідовностями викликів АРІ функцій.

Мережний метод виявлення файлового ЗПЗ є основою для організації функціонування програмних модулів РБС і дозволяє здійснити вилучення ймовірно уражених ПМ з РБС, встановлення відношення до файлового ЗПЗ на основі обміну і обробки знань, сканування виконуваних файлів створенням для них окремих процесів. Він базується на двох методах, які здійснюють побудову поведінкової сигнатури та її подальший аналіз на наявність файлового ЗПЗ і розбиття на блоки виконуваної програми та дослідження її на наявність поліморфного та метаморфного вірусу. Для здійснення детальнішого аналізу програмного коду на основі мережного методу до процесу виявлення залучаються інші ПМ РБС.

Напрямоком подальших досліджень є розробка нових методів для виявлення ЗПЗ з метою розширення можливостей розподіленої системи для виявлення.

Література

1. Українська правда. Затримали хакерів, які "чистили" банківські рахунки і переводили кошти в криптовалюту [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.pravda.com.ua>

/news/2019/01/10/7203471/ (дата звернення 25.03.2019). – Назва з екрану.

2. Українська правда. Найвідомішим у Darknet ресурсом заправляли українці – Кіберполіція [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.pravda.com.ua/news/2019/01/28/7205116/> (дата звернення 25.03.2019). – Назва з екрану.

3. Фокус. Хакеры через WordPress пытались атаковать сайт ЦИК, СБУ [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://focus.ua/ukraine/422005-xakery-cherez-wordpress-pytalis-atakovat-sajt-cik--sbu.html> (дата обращения 25.03.2019). – Название с экрана.

4. Markowsky G. Distributed Malware Detection System Based on Decentralized Architecture in Local Area Networks / G. Markowsky, O. Savenko, A. Sachenko // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. – 2019. – Vol. 871. – P. 582–598.

5. Komar M. High performance adaptive system for cyber attacks detection / M. Komar, V. Kochan, L. Dubchak, A. Sachenko, V. Golovko, S. Bezobrazov, I. Romanets // *Proceedings of the 9th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications*. – Bucharest (Romania), 21-23 September, 2017. – Vol. 2. – P. 853–858.

6. Golovko V. Neural Network Artificial Immune System for Malicious Code Detection / V. Golovko, S. Bezobrazov // *Brest State Technical University*. – 2015. – P. 1–7.

7. Branitskiy A. Hybridization of computational intelligence methods for attack detection in computer networks / A. Branitskiy, I. Kotenko // *Journal of Computational Science*. – 2017. – No. 23. – P. 145–156.

8. Wang G. A new approach to intrusion detection using Artificial Neural Networks and fuzzy clustering / G. Wang, J. Hao, J. Ma // *Huang L. Expert Systems with Applications // An International Journal*. – 2010. – Vol. 37. – Issue 9. – P. 6225–6232.

9. Савенко О.С. Формування сигнатури поведінки програм на основі трасування API викликів / О.С. Савенко, А.О. Нічепорук, А.А. Нічепорук, Ю.О. Нічепорук // *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. – 2018. – № 29(105). – С. 67–77.

10. Markowsky G. The technique for metamorphic viruses' detection based on its obfuscation features analysis / G. Markowsky, O. Savenko, S. Lysenko, A. Nicheporuk // *CEUR-WS* – 2018. – Vol. 2104. – P. 680–687.

11. Савенко О.С. Архітектура багаторівневої програмної системи виявлення шкідливого програмного забезпечення в локальних комп'ютерних мережах / О.С. Савенко, В.І. Грибинчук, М.О. Кульчицький // *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво*. – 2018. – № 30-31. – С. 132–140.

References

1. Ukrainska pravda. Zatrimaly khakeriv, yaki "chystyly" bankivski rakhunky i perevodyly koshty v kryptovaliutu [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : <https://www.pravda.com.ua/news/2019/01/10/7203471/> (data zvernennia 25.03.2019). – Nazva z ekranu.

2. Ukrainska pravda. Naividomishym u Darknet resursom zapravlialy ukraintsi – Kiberpolitsiia [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : <https://www.pravda.com.ua/news/2019/01/28/7205116/> (data zvernennia 25.03.2019). – Nazva z ekranu.

3. Fokus. Hakery cherez WordPress pytalis atakovat sajt CIK, SBU [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : <https://focus.ua/ukraine/422005-xakery-cherez-wordpress-pytalis-atakovat-sajt-cik--sbu.html> (data ob-rasheniya 25.03.2019). – Nazvanie s ekranu.

4. Markowsky G. Distributed Malware Detection System Based on Decentralized Architecture in Local Area Networks / G. Markowsky, O. Savenko, A. Sachenko // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. – 2019. – Vol. 871. – P. 582–598.

5. Komar M. High performance adaptive system for cyber attacks detection / M. Komar, V. Kochan, L. Dubchak, A. Sachenko, V. Golovko, S. Bezobrazov, I. Romanets // *Proceedings of the 9th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications*. – Bucharest (Romania), 21-23 September, 2017. – Vol. 2. – P. 853–858.

6. Golovko V. Neural Network Artificial Immune System for Malicious Code Detection / V. Golovko, S. Bezobrazov // *Brest State Technical University*. – 2015. – P. 1–7.

7. Branitskiy A. Hybridization of computational intelligence methods for attack detection in computer networks / A. Branitskiy, I. Kotenko // *Journal of Computational Science*. – 2017. – No. 23. – P. 145–156.

8. Wang G. A new approach to intrusion detection using Artificial Neural Networks and fuzzy clustering / G. Wang, J. Hao, J. Ma // *Huang L. Expert Systems with Applications // An International Journal*. – 2010. – Vol. 37. – Issue 9. – P. 6225–6232.

9. Savenko O.S. Formuvannia syhnatury povedinky program na osnovi trasuvannia API vyklykiv / O.S. Savenko, A.O. Nicheporuk, A.A. Nicheporuk, Yu.O. Nicheporuk // *Elektrotekhnichni ta kompiuterni systemy*. – 2018. – № 29(105). – S. 67–77.

10. Markowsky G. The technique for metamorphic viruses detection based on its obfuscation features analysis / G. Markowsky, O. Savenko, S. Lysenko, A. Nicheporuk // *CEUR-WS* – 2018. – Vol. 2104. – P. 680–687.

11. Savenko O.S. Arkhitektura bahatorivnevoi programnoi systemy vyvavlennia shkidlyvoho prohramnoho zabezpechennia v lokalnykh kompiuternykh merezhakh / O.S. Savenko, V.I. Hrybynchuk, M.O. Kulchytskyi // *Kompiuterno-intehrovani tekhnolohii: osvita, nauka, vyrobnytstvo*. – 2018. – № 30-31. – S. 132–140.

Рецензія/Peer review : 27.3.2019 р.

Надрукована/Printed : 11.4.2019 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Говорущенко Т.О.

В. М. ДЖУЛІЙ, В. І. ЧОРНЕНЬКИЙ, О. О. САВИЦЬКА
Хмельницький національний університет

МЕТОД ВИЯВЛЕННЯ ТА ПРОТИДІЇ РОЗПОДІЛЕНИМ АТАКАМ, СПРЯМОВАНИМ НА ВІДМОВУ В ОБСЛУГОВУВАННІ

В роботі запропоновано актуальний метод та інструментарій для раннього виявлення розподілених атак, спрямованих на відмову в обслуговуванні, і подальшого виявлення шкідливого трафіку на стороні ресурсу, що атакується і його блокування власними силами. Для поділу змішаного трафіку використовується алгоритм кластеризації k -means. Вибір даного алгоритму обґрунтований, проведено доказ його ефективності, підібрані оптимальні характеристики і розмірність даних, вироблені критерії успішності. Розроблені алгоритми складають основу узагальненої методики виявлення DDoS-атак і шкідливого трафіку.

Ключові слова: моделі, алгоритми, ефективність виявлення атак, метод, мережевий трафік, інформаційна безпека.

V. M. DZHULIY, V. I. CHORNENKY, O. O. SAVITSKAYA
Khmelnitskyi National University

METHODS OF DETECTION AND COUNTERACTION TO THE DISTRIBUTED ATTACKS AIMED AT FAILURE IN SERVICE

The purpose of the work is to create an actual method and tool for early detection of the distributed attacks aimed at denial of service, and further detection of any harmful traffic directed on the attacked resource and its own blocking. Countermeasures specialized to ensure the security of small and medium-sized resources, have received less development due to the predominance of large severe attacks in the past. And now they are lagging behind the evolution of DDoS attacks themselves. As a part of the method development for detecting DDoS attacks and malicious traffic, an original algorithm has been created for detecting a distributed attack at the early stages of a denial of service attack. The algorithm takes into account seasonal deviations in the load, which makes it possible to detect the point of attack in the early stages and with greater accuracy. Besides, research was conducted to confirm the existence of seasonality and to identify any typical seasonal periods. As a result of the research the week, daily and uncertain seasonality and the reasons of its emergence are revealed. It was revealed the tendency of medium and low power attacks on regional resources. The peculiarities of regional level DDoS attacks were investigated and the task of creating a method and software complex for the detection of DDoS attacks and malicious inquiries was solved. The received technique was tested on the data - for legitimate requests, the completeness of the detection was 0.9991 with an accuracy of 0.99811, for malicious inquiries, completeness of 0.9975, accuracy of 0.9924.

Keywords: models, algorithms, attack detection efficiency, method, network traffic, information security.

Вступ

DDoS-атака – розподілена атака, спрямована на відмову в обслуговуванні. В результаті атаки такого типу мережевий ресурс, що атакується, отримує лавиноподібну кількість запитів, які не встигає обробити сервер. Джерелом шкідливих запитів є так звані зомбі-мережі, що складаються переважно з комп'ютерів звичайних користувачів, в силу якихось причин заражених шкідливим програмним забезпеченням. Періодичні повідомлення в засобах масової інформації про недоступність тих чи інших ресурсів в результаті розподілених атак, спрямованих на відмову в обслуговуванні, говорять про неефективність засобів протидії такого роду атак. Також збільшується кількість атак і до невеликих, «середніх» сайтів, які до недавнього часу не становили інтересу для зловмисників. Однак, в даний час, у зв'язку зі збільшенням їх важливості і загребуваності, перебоїв в їх роботі можуть бути критичними. Разом з цим змінюються і мотиви, які рухають зловмисниками, якщо раніше серед причин виникнення DDoS-атак можна було виділити протест, хуліганство і т.д., то сьогодні все частіше DDoS-атаки є наслідком шантажу і способом вимагання грошей. Це переводить DDoS-атаки з площини одиничних протестних акцій в область кримінального бізнесу, які не обмежуються вимаганням, але і є інструментом екстремістських і терористичних організацій [2].

Сьогодні у всьому світі стали звичайною ситуацією атаки на сайти державної влади напередодні виборів або важливих політичних подій [1, 5]. Для паралізації невеликого регіонального ресурсу досить невеликої за потужністю атаки і як наслідок невеликої бот-мережі. Обслуговування та підтримка таких бот-мереж є менш витратним, і потенційно створити такі мережі може більшість зловмисників. Цей факт на фоні відсутності адекватних засобів протидії робить загрози безпеки регіональних ресурсів в результаті DDoS-атак особливо значущими. З одного боку, для протидії таким атакам можуть бути ефективно застосовані засоби, призначені для відображення великих атак. З іншого – впровадження і підтримка таких засобів є економічно затратною і не по кишені регіональним ресурсам. Засоби протидії, спеціалізовані саме на забезпечення безпеки невеликих і середніх ресурсів, отримали менший розвиток через переважання в минулому саме великих атак. І в даний час відстають від еволюції самих DDoS-атак [6].

Відповідно до звіту, опублікованого компанією «Лабораторія Касперського», число DDoS-атак постійно збільшується [3, 4]. Так, наприклад, за друге півріччя 2017 р. значно збільшилася кількість атак. При цьому збільшилася і потужність проведених атак, в порівнянні з першим півріччям вона виросла на 57%.

Разом з кількістю і потужністю постійно зростає і складність самих атак. Зловмисники шукають принципово нові методи проведення атак, і дуже часто існуючі засоби захисту виявляються безсилими перед ними. Так, наприклад, порівняно новий вид DDoS-атак – THC-SSL-DOS – експлуатує особливості SSL протоколу і дає можливість одному комп'ютеру зробити недоступним сервер середньої конфігурації [3]. В

2017 р. був атакований сайт американської біржі Nasdaq. В результаті атаки сайт повністю перестав реагувати на запити. При цьому біржа Nasdaq є найбільшою електронною фондовою біржею США і другою в світі за величиною ринкової капіталізації [5]. Україна також не відстає від світової тенденції зростання DDoS-атак, а по деяких позиціях займає навіть перші місця. За повідомленнями засобів масової інформації, з лютого по березень 2017 р. з України було проведено понад 2,4 мільйона кібер-атак.

Найбільш характерним проявом DDoS-атак є «затоплення» або flooding каналу зв'язку або конкретного мережного пристрою величезною кількістю мережових пакетів. В залежності від типу пакетів, це може призвести до перевантаження каналу і, як наслідок, неможливості проходження по ньому легітимного трафіку, або до підвищеної завантаженості пристрою (заповнення доступного обсягу оперативної пам'яті і завантаження ресурсів процесора).

При достатніх обчислювальних і серверних потужностях, можливо зробити перенаправлення трафіку назад до атакуючого. Цей метод досить складний в реалізації і вимагає не тільки хорошої матеріальної бази, а й високої кваліфікації адміністратора серверного ресурсу.

Постановка задачі

В результаті проведеного дослідження відмічено, що в даний час значно збільшилася кількість DDoS-атак середньої і малої інтенсивності, спрямованих, як правило, на регіональні ресурси. Це збільшення цілком прогнозовано - з розвитком мережі збільшується потенційна кількість можливих жертв. Крім того, вдосконалюється сам механізм проведення атак. Для зловмисника проведення атаки вже не є настільки складним. А зомбі-комп'ютери намагаються емулювати дії самих користувачів. Все це веде до загального збільшення числа атак.

Аналіз засобів протидії показав, що в даний час більший розвиток отримала група засобів протидії, призначена для відбиття потужних атак. У цю групу входять, як правило, дорогі засоби, призначені для великих провайдерів або компаній. Засоби протидії невеликим і середнім атакам, що розміщені на сервері, представлені в незначній кількості. При цьому аналіз вхідного трафіку на рівні додатків може бути більш ефективним. З одного боку, проведення такого аналізу економічно менш затратно, з іншого – може бути цілком достатнім для відбиття малих і середніх атак, тенденція домінування яких вже намітилася.

Основна частина

Оптимальним рішенням для виявлення початку атаки і подальшого виявлення шкідливого трафіку буде рішення, засноване на аналізі аномалій, в результаті якого відбувається порівняння поточного стану системи з її нормальним станом. Порівняння станів системи в контексті DDoS-атак можна проводити шляхом порівняння різних властивостей мережової активності. До цих властивостей можуть бути віднесені: кількість запитів, тип запитів, кількість запитів певного типу або протоколу, IP адреса джерела, швидкість надходження запитів, їх час і т.д.

Нехай множина $A(a_1, a_2, a_3, \dots, a_n)$ – набір всіх можливих властивостей для всіх мережових клієнтів. Множина $B(b_1, b_2, b_3, \dots, b_m)$ – множина легітимних клієнтів конкретного мережового ресурсу. Кожен мережовий клієнт має набір індивідуальних властивостей. Наприклад, клієнт b_1 має властивості $A1(a_4, a_8, a_{10}, a_{14})$, клієнт b_2 має властивості $A2(a_3, a_8, a_{11}, a_{14})$ і т.д. Дані властивості представляють набір підмножин множини A . Перетин всіх цих підмножин характеризує клієнтів мережового ресурсу, за якими вони можуть бути класифіковані. Точно так нелегітимні клієнти матимуть свій набір властивостей, за яким вони також можуть бути класифіковані.

На сьогоднішній день DDoS-атаки ускладнюються, і зловмисники намагаються повністю імітувати поведінку легітимних клієнтів. У цій ситуації перевагу при аналізі властивостей мережової активності необхідно віддати тим властивостям, які не можуть бути підроблені зловмисниками. При нестачі таких властивостей необхідно вводити штучні властивості, наприклад, проходження модифікації тест Тьюринга – введення даних з картинки.

Таким чином, завдання по визначенню і виявленню шкідливих запитів в контексті даної роботи зводиться до їх класифікації на підставі властивостей мережової активності. Оптимальним рішенням для виявлення шкідливого трафіку є використання різних класифікаторів і нейронних мереж. Складністю в реалізації даного рішення є той факт, що для нормального функціонування класифікатора потрібно мати дві актуальні навчальні вибірки, відповідно шкідливому і легітимному трафіку. Однак до моменту початку атаки отримати ці вибірки не представляється можливим. Це цілком очевидно для вибірки, що відповідає шкідливому трафіку, так як до початку атаки шкідливі запити відсутні. Але це також справедливо і для вибірки, що характеризує легітимний трафік. Так як мережева картина постійно змінюється, буде змінюватися і вміст вибірки відповідного легітимного трафіка. Таким чином, вибірка по легітимності трафіка, наприклад, місячної давності, може бути не актуальна для поточної мережової ситуації. Крім того, є ризик, що в цій вибірці можуть виявитися дані, відповідні шкідливим запитам, що в подальшому викличе помилки в роботі класифікатора.

Дана проблема актуальна, тому що зловмисник може спеціально почати підмішувати до легітимного трафіку незначне число шкідливих запитів, які не зможуть бути ідентифіковані як початок атаки, але зможуть негативно «навчити» вибірку, що характеризує легітимний трафік. Для подолання цієї проблеми необхідно точно визначити точку початку атаки. Це дасть можливість весь попередній трафік віднести до легітимного і відкрити додаткові можливості по розділенню змішаного трафіку, який приходить після початку атаки, на легітимний і шкідливий.

В цьому випадку методика виявлення шкідливого трафіку, в першому наближенні, буде зводитися до наступних кроків: визначаємо актуальні сезонні періоди; з урахуванням сезонності визначаємо точку початку атаки; відносимо весь попередній перед початком атаки трафік до легітимного; класифікуємо змішаний трафік на легітимний і шкідливий; порівнюємо легітимний трафік виділений зі змішаного з трафіком що надійшов до початку атаки; на підставі результатів, отриманих на попередньому кроці і вироблених критеріїв успішності, коригуємо вибірки; весь вступний трафік аналізуємо з урахуванням отриманих даних.

Початок DDoS-атаки пов'язаний зі збільшенням числа запитів до атакованого сервера. Таким чином, для фіксації факту атаки необхідно встановити границю по кількості запитів до сервера, при порушенні якої однозначно буде фіксуватися нештатна ситуація. Такою границею може виступати максимальна кількість запитів до сервера, плюс деякий запас можливих запитів. Можливість установки граничної межі, після якої буде відбуватися оповіщення адміністраторів, активація необхідних модулів і т.д., реалізована в різних мережових засобах як програмного, так і апаратного рівня. При цьому такий підхід має ряд мінусів:

1. Для запобігання випадкових спрацьовувань, межа що встановлюється повинна бути істотно вище максимального рівня кількості запитів. Що, в свою чергу, призводить до виникнення похибки при виявленні атаки.

2. Мережовий ресурс може відчувати різне навантаження в залежності від часу доби і днів тижня. В цьому випадку атака, що почалася в період затишшя, наприклад, у вихідний день або вночі, буде зафіксована із запізненням. Якщо в системі запобігання вторгнень передбачено використання класифікаторів та навчання фільтрів на підставі вхідного трафіку, є ймовірність в їх негативному навчанні.

Для вирішення зазначених проблем необхідно використовувати ковзаючу оцінку, що характеризує поточну мережову активність. На підставі цієї оцінки встановлювати динамічну границю, актуальну для періоду можливого початку атаки. В якості ковзаючої оцінки можливо використовувати середньоквадратичне відхилення:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (1)$$

де σ – середньоквадратичне відхилення; n – кількість розглянутих часових періодів; x_i – кількість запитів за i -період;

\bar{x} – середнє арифметичне запитів по всіх періодах.

В результаті експериментів, було встановлено, що для різних сайтів оптимальне значення верхньої межі може відрізнятися і перебувати, як правило, в діапазоні від 2.2σ до 2.9σ . З цієї причини, для більш гнучкого налаштування програмного забезпечення по виявленню початку DDoS-атаки, цей параметр задається не жорстко. У оператора програмного комплексу є можливість варіювати значення даного параметра. Однак такий підхід також має потенційну вразливість, пов'язану з тим, що зловмисник може поступово нарощувати потужність атаки, зрушуючи при цьому границю середньоквадратичного відхилення. усунути дану вразливість може облік сезонних коливань.

Такий підхід дозволяє сформувати досить точну верхню межу, порушення якої може бути витлумачено як виникнення мережової аномалії. Збільшення точності дозволяє зменшити час, необхідний для виявлення атаки, і досить точно зафіксувати її початок.

Крім того, в рамках такого підходу виключаються можливості негативного навчання фільтрів і спрацьовування системи виявлення з запізненням шляхом поступового нарощування потужності атаки. Так як межа в цьому випадку буде будуватися за схожими сезонним періодами. Наприклад, поступове нарощування потужності атаки протягом дня буде зафіксовано при порівнянні кількості запитів з кількістю запитів актуальних сезонних періодів за минулу добу.

Виявлення і дослідження сезонності. В рамках раннього виявлення початку атаки, і з огляду на перспективність підходу необхідно враховувати сезонні коливання, провести додаткове дослідження, що вивчає сезонні коливання кількості запитів до мережових Internet ресурсів. Основним завданням дослідження був доказ існування сезонних періодів в роботі web-сайтів. А також вирішення питання, чи може випадковий сплеск в відвідуваності Internet ресурсу, викликаний, наприклад, публікацією на нього посилання з високо відвідуваного ресурсу, викликати порушення сезонності, і, як наслідок, помилкове спрацьовування.

В результаті дослідження для поділу змішаного трафіку на легітимний і шкідливий обраний метод кластеризації на основі алгоритму k-means. Метод забезпечує прийнятну точність, мінімальне навантаження і оптимальну швидкість роботи. Даний алгоритм дозволяє провести кластеризацію при заздалегідь відомому числі кластерів. Алгоритм має прийнятну точність, необхідну для первинного поділу, і більш високу швидкість роботи, порівнянню з іншими алгоритмами.

Суть алгоритму полягає в виділення двох кластерів і обчисленні їх центрів мас, на наступних ітераціях відбувається корекція кластерів (перенесення елементів в відповідно до розрахованих центрів мас) і перерахування центрів мас.

$$V = \sum_{i=1}^k \sum_{x_j \in S_i} (x_j - \mu_i)^2, \quad (2)$$

де k – число кластерів;
 S_i – отримані кластери, $i = 1, 2, \dots, k$;
 μ_i – центри мас векторів $x_j \in S_i$.

В результаті роботи алгоритму змішаний трафік буде розділений на два кластера, відповідних легітимному і шкідливому трафіку.

Таким чином, на даному етапі доступні для аналізу і обробки три групи трафіку:

1. Відповідно, легітимному трафіку, що передуює початку атаки – T .
2. Відповідно, легітимному трафіку, виділений із змішаного трафіку – T^* .
3. Відповідно шкідливому трафіку, виділений із змішаного трафіку – H .

Критерії успішності, корекція отриманих кластерів. Для оцінки ефективності кластеризації розглянемо рівняння стаціонарних ймовірностей:

$$\begin{aligned} p_0 \lambda &= p_1 \mu \\ (\lambda + i \mu) p_i &= \lambda p_{i-1} + (i+1) \cdot \mu p_{i+1}, \quad i = 1, \dots, K-2, \\ (\lambda + (K-1) \mu) p_{K-1} &= \lambda p_{K-2} + K \bar{N} \cdot \mu p_K, \\ (\lambda^* + K \bar{N} \mu) p_K &= \lambda p_{K-1} + K \bar{N} \cdot \mu p_{K+1}, \\ (\lambda^* + i \mu^*) p_i &= \lambda^* p_{i-1} + (i+1) \cdot \mu^* p_{i+1}, \quad i = K+1, \dots, N-1 \end{aligned} \quad (3)$$

де λ – інтенсивність навантаження;
 λ_L – інтенсивність навантаження, створювана легальними користувачами;
 S – інтенсивність шкідливого трафіку, μ – інтенсивність звільнення черги запитів;
 μ^* – інтенсивність звільнення черги запитів при активованому фільтрі,
 K – межа активації фільтра;
 N – обсяг черги запитів;
 $\lambda = \lambda_L + S$ – навантаження в момент атаки;
 $\lambda^* = \lambda_L + S(1 - E_2)$ – навантаження при активованому фільтрі;
 E_1, E_2 – помилки першого і другого роду,

При нормуванні $\sum_{i=1}^N p_i = 1$, отримуємо ймовірність блокування запиту.

$$p_{BLK} = \frac{\frac{1}{N!} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^{K-1} \frac{\lambda}{\mu^*} \left(\frac{\lambda^*}{\mu^*} \right)^{N-K}}{\sum_{i=0}^{K-1} \frac{\left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^i}{i!} + \sum_{i=K}^N \frac{1}{i!} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^{K-1} \frac{\lambda}{\mu^*} \left(\frac{\lambda^*}{\mu^*} \right)^{i-K}} \quad (4)$$

Таким чином, ефективність поділу шкідливого і легітимного трафіку можна оцінити як $R = (1 - E_1) \cdot (1 - p_B)$.

На підставі отриманої оцінки, були вироблені критерії успішності.

На наступному кроці алгоритму проводиться корекція отриманих вибірок з урахуванням наступних критеріїв:

1. Критерій розмірності отриманих кластерів. Якщо в поточному періоді, що відноситься до атаки, кількість запитів – n , а в аналогічних сезонних періодах, що відносяться до легітимного трафіку – m , то кількість шкідливих запитів буде наближено рівним $n-m$. Це ж справедливо і для різних властивостей мережевої активності (кількість запитів до цільової сторінки, цільового порту, за певним протоколом і т.д.)

2. Критерій схожості легітимних вибірок. Максимальна схожість легітимної вибірки, що передуює початку атаки, з легітимною вибіркою, виділеної зі змішаного трафіку.

3. Критерій відповідності центрів мас. Центр мас надійної вибірки, виділеної із змішаного трафіку, повинен відповідати аналогічному сезонному періоду надійного трафіку, що передуює початку атаки. Іншими словами, відстань між цими центрами мас повинна наближатися до нуля. Для подальшого уточнення можна розрахувати ймовірність приналежності кожного елемента своєму класу. Елементи з найменшою ймовірністю переносяться в протилежні групи з урахуванням критерію розмірності груп.

Для розрахунку схожості надійних кластерів і надалі для класифікації запитів, що надходять можна скористатися «Байсовим класифікатором». В якості ймовірнісної моделі для класифікатора використовуємо умовну ймовірність $p(C | F_1, \dots, F_n)$ над залежною змінною класу C з малою кількістю результатів або класів, що залежить від декількох змінних F_1, \dots, F_n . Використовуючи теорему Байеса, запишемо:

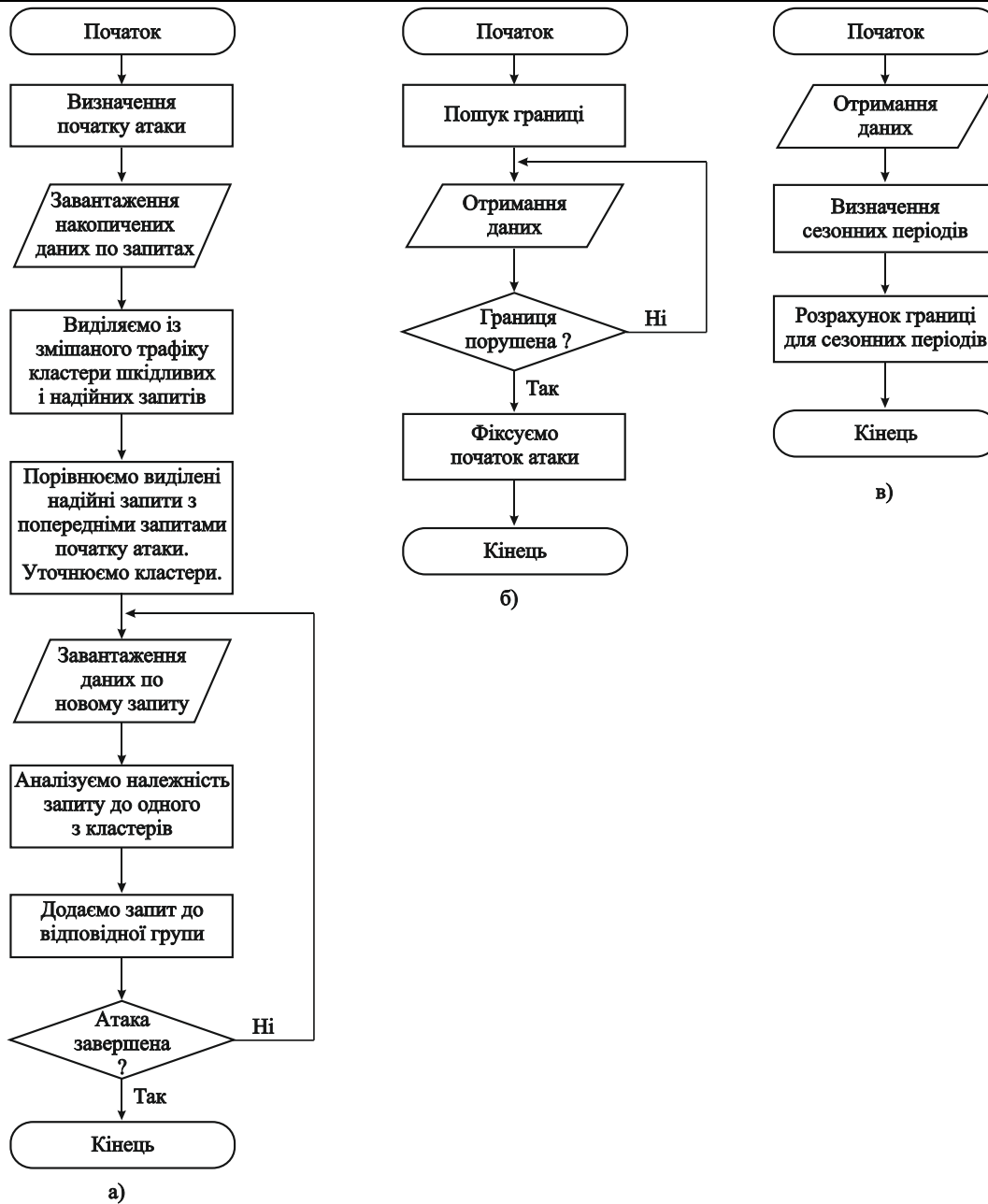


Рис. 1. Алгоритми р визначення початку атаки і виділення шкідливого трафіку

$$p(C | F_1, \dots, F_n) = \frac{p(C) \cdot p(F_1, \dots, F_n | C)}{p(F_1, \dots, F_n)}$$

Умовний розподіл по класовій змінній C може бути виражено так:

$$p(C | F_1, \dots, F_n) = \frac{1}{Z} p(C) \prod_{i=1}^n p(F_i | C)$$

Таким чином, для класифікації трафіку за двома класами отримаємо:

$$P(T | D) = \frac{P(T)}{P(D)} \prod_{i=1}^n P(w_i | T) \text{ – для класу надійних користувачів;}$$

$$P(H | D) = \frac{P(H)}{P(D)} \prod_{i=1}^n P(w_i | H) \text{ – для класу ненадійних користувачів.}$$

В якості навчальних вибірок використовуються множина T і множина H . Після закінчення цього кроку елементи з множини T^* , віднесені до групи шкідливого трафіку, міняються місцями з елементами множини H з урахуванням зазначених вище критеріїв. Даний крок повторюється до тих пір, поки всі елементи множини T не будуть позначені як легітимні, або поки алгоритм не досягне порогового значення ітерацій.

Отримані вибірки, відповідні легітимному і шкідливому трафіку, а також механізм їх підтримки в актуальному стані дозволяють використовувати їх з різними класифікаторами. На рис. 1 показані

принципові схеми алгоритмів по визначенню початку атаки і виділенню шкідливого трафіку. Перша схема (рис. 1 а) пояснює алгоритм виділення шкідливого трафіку, друга (рис. 1 б) і третя (рис. 1 в) – алгоритми визначення початку атаки.

На першому кроці відбувається виклик підпрограм по виявленню сезонних періодів, розрахунку для них допустимої межі кількості запитів, і визначення початку атаки. У разі початку атаки, алгоритм повинен розподілити змішаний трафік на два кластери, один містить шкідливі запити, інший надійні запити. Дані кластери уточнюються. Нові запити аналізуються на приналежність того або іншому кластеру і за результатом додаються до відповідного кластеру.

Висновки

В рамках розробки методу виявлення DDoS-атак і шкідливого трафіку розроблений оригінальний алгоритм виявлення на ранніх стадіях точки початку розподіленої атаки, спрямованої на відмову в обслуговуванні. Алгоритм враховує сезонні відхилення в навантаженні, що дає можливість виявляти точку початку атаки на ранніх стадіях і з більшою точністю. Додатково проведено дослідження, спрямоване на підтвердження існування сезонності і виявлення типових сезонних періодів. В результаті дослідження виявлені тижнева, добова і невизначена сезонність і причини її виникнення.

Розроблено метод отримання навчальних вибірок та класифікації трафіку, що надходить, на групи шкідливих і легітимних запитів. Для поділу змішаного трафіку використовується алгоритм кластеризації k-means. Вибір даного алгоритму обґрунтований, проведено доказ його ефективності. Для алгоритму підібрані оптимальні характеристики і розмірність даних, вироблені критерії успішності. Розроблені алгоритми складають основу узагальненої методики виявлення DDoS-атак і шкідливого трафіку, яка в загальному вигляді може бути описана так: за допомогою статистичних даних, визначаємо існуючі сезонні періоди; для кожного сезонного періоду визначаємо допустиму верхню межу кількості запитів; у разі порушення границі, фіксуємо точку початку атаки; відносимо весь, що передувало початку атаки, трафік до кластеру, відповідного легітимного трафіку; за допомогою алгоритму k-means класифікуємо змішаний трафік на легітимний і шкідливий; порівнюємо трафік, що передувало початку атаки, з кластером, легітимного трафіку, виділеного зі змішаного трафіку; на підставі результатів, отриманих на попередньому кроці, і з урахуванням вироблених критеріїв успішності, коригуємо кластери; весь трафік, що надходить, аналізуємо з урахуванням отриманих в попередньому пункті результатів.

Література

1. Бабаш А.В. Криптографические методы защиты информации : учебник для студ. вузов / А. В. Бабаш, Е. К. Баранова. – М. : КНОРУС, 2016. – 190 с.
2. Батурин Ю.М. Компьютерная преступность и компьютерная безопасность / Ю.М. Батурин, А.М. Жодзинский. – М. : Юридическая литература, 2006. – 160 с.
3. Борисов М.А. Основы программно-аппаратной защиты информации : учеб. пособие для вузов / М.А. Борисов, И.В. Заводцев, И.В. Чижов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : ЛЕНАНД, 2016. – 416 с.
4. Васильева И.Н. Криптографические методы защиты информации : учебник и практикум для академ. бакалавриата / И.Н. Васильева. – Санкт-Петербург. гос. эконом. ун-т. – М. : Юрайт, 2017. – 349 с.
5. Нестеров С.А. Основы информационной безопасности : учебник / С. А. Нестеров. – СПб : Лань, 2017. – 423 с.
6. Олифер В.Г. Безопасность компьютерных сетей / В.Г. Олифер, Н.А. Олифер. – М. : Горячая линия-Телеком, 2017. – 644 с.
7. Тихоненко О.М. Модели массового обслуживания в информационных системах : учебное пособие для ВУЗов / О.М. Тихоненко. – Минск : Технопринт, 2003. – 327 с.
8. Шаньгин В. Ф. Информационная безопасность и защита информации / В.Ф. Шаньгин. – М. : ДМК Пресс, 2017. – 702 с.

References

1. Babash A.V. Kriptograficheskie metody zashhity informacii : uchebnik dlja stud. vuzov / A. V. Babash, E. K. Baranova. – M. : KNORUS, 2016. – 190 s.
2. Baturin Ju.M. Komp'juternaja prestupnost' i komp'juternaja bezopasnost' / Ju.M. Baturin, A.M. Zhodzinskij. – M. : Juridicheskaja literatura, 2006. – 160 s.
3. Borisov M.A. Osnovy programmno-apparatnoj zashhity informacii : ucheb. posobie dlja vuzov / M.A. Borisov, I.V. Zavadcev, I.V. Chizhov. – 4-e izd., pererab. i dop. – M. : LENAND, 2016. – 416 s.
4. Vasil'eva I.N. Kriptograficheskie metody zashhity informacii : uchebnik i praktikum dlja akadem. bakalavriata / I.N. Vasil'eva. – Sankt-Peterb. gos. jekonom. un-t. – M. : Jurajt, 2017. – 349 s.
5. Nesterov S.A. Osnovy informacionnoj bezopasnosti : uchebnik / S. A. Nesterov. – SPb : Lan', 2017. – 423 s.
6. Olifer V.G. Bezopasnost' komp'juternyh setej / V.G. Olifer, N.A. Olifer. – M. : Gorjachaja linija-Telekom, 2017. – 644 s.
7. Tihonenko O.M. Modeli massovogo obsluzhivaniya v informacionnyh sistemah : uchebnoe posobie dlja VUZov / O.M. Tihonenko. – Minsk : Tehnoprnt, 2003. – 327 s.
8. Shan'gin V.F. Informacionnaja bezopasnost' i zashhita informacii / V.F. Shan'gin. – M. : DMK Press, 2017. – 702 s.

Рецензія/Peer review : 15.3.2019 р.

Надрукована/Printed : 10.4.2019 р.

Рецензент: д. т. н., проф. Мясіщев О. А.

А. А. ТКАЧУК, В. Ю. ЗАБЛОЦЬКИЙ,
Й. Р. СЕЛЕПИНА, С. А. МОРОЗ, Т. В. ТЕРЛЕЦЬКИЙ
Луцький національний технічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ БАЗОВИХ СТАНЦІЙ МЕРЕЖ СТІЛЬНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ

В роботі проведено дослідження адаптивного алгоритму вимірювання швидкості Internet-з'єднання шляхом зміни розміру тестового файлу. Встановлено ряд оптимальних розмірів тестових файлів залежно від типу з'єднання. Проведено добовий моніторинг бітової швидкості. Запропоновано виконувати перерозподіл ресурсів базової станції задля стабілізації бітової швидкості, економії електроенергії та покращення умов експлуатації базових станцій.

Ключові слова: моніторинг, з'єднання, навантаження, абонентський термінал, стільникова мережа.

A. A. TKACHUK, V. Y. ZABLOTSKY, Y. R. SELEPYNA, S. A. MOROZ, T. V. TERLETS'KYI
Lutsk National Technical University

RESEARCH OF FUNCTIONING MODES OF BASE STATIONS MOBILE COMMUNICATION NETWORK

In this paper, an adaptive algorithm for measuring the speed of an Internet connection was performed by changing the size of the test file. There are a number of optimal sizes of test files depending on the type of connection. The speed measurement will take place as follows: the small file is initially transmitted and the bit rate is determined in relation to the reference time interval. If the test file is transmitted without delay, then the second step will be a repetition of the procedure with a larger file, and so on until the results of two consecutive measurements will not be the same order, then the results are averaged and displayed to the operator, as the final results of the measurement. After conducting a test study with the first file, the second file is selected, then if the file is transmitted for the same short time, several steps can be skipped and immediately selected a larger file that will more accurately determine the bit rate of the Internet connection. According to the proposed algorithm, the volume of test data is automatically selected, depending on the bandwidth of the channel, therefore the operator error is excluded from the measurement procedure. An alternative, passive way of determining the hours of maximum and minimum load, as well as the maximum and minimum speeds of the Internet connection is offered. When using a passive way to control the bit rate of an Internet connection, the minimum amount of traffic is spent, and bit rate control can be carried out continuously. The bit rate of the investigated terminal depends on the violation of the orthogonality of the codes of the investigated terminal caused by the multipath signal propagation, as well as the violation of the orthogonality of the codes of other subscriber terminals caused by the multiple use of frequency. Daily monitoring of bit rate is carried out. It is proposed to redistribute the resources of the base station in order to stabilize bit rate, save energy and improve the operating conditions of the base stations.

Keywords: monitoring, connection, loading, subscriber terminal, mobile network.

Вступ

На даний момент послуги зв'язку в мережах WCDMA в Україні надають такі компанії, як «Київстар», «Vodafone» Україна та «Lifecell». Операторам необхідно підтримувати якість послуг на високому рівні, тому виникає потреба періодично проводити тестування мереж стільникового зв'язку. Процедура тестування каналу зв'язку відбувається наступним чином. На віддаленому сервері формується тестовий файл певного обсягу, потім сформований файл передається на тестовий пристрій. Швидкість передачі даних визначається як обсяг переданих даних за певний проміжок часу. Зазвичай це проміжок становить одну секунду, але інколи необхідно визначити середню швидкість передачі даних за годину або за добу. Деякі сервіси перед запуском алгоритму вимірювання швидкості пропонують вибрати тип з'єднання терміналу з мережею, це забезпечує більш коректне вимірювання швидкості, так як обсяг тестового файлу буде змінюватися залежно від обраного типу з'єднання. Проте набір тестових файлів визначено заздалегідь для кожного типу з'єднання і це може викликати неточності при вимірюванні швидкості Internet-з'єднання через неможливість зміни в часі кінцевого обсягу переданих даних. Наприклад: через програмну помилку в роутері зі вбудованим бездротовим модемом, швидкість Internet-з'єднання досліджуваного абонентського терміналу (АТ) обмежена. При тестуванні оператор вибере ширококутне з'єднання, так як провайдер надає такий тип з'єднання, при цьому сервер тестування швидкості задасть тестовий файл великого обсягу, що необхідно для точного визначення швидкості передачі даних. Під час передачі файлу відбудеться «пробка» в найвужчому місці, в даному випадку в роутері. Через низьку швидкості, тестування відбуватиметься довше, запланованого, що може призвести до помилок визначення швидкості Internet-з'єднання або до «зависання» сервісу [1, 2, 4].

Для того щоб уникнути таких ситуацій, пропонується використати адаптивний алгоритм вимірювання швидкості способом зміни розміру файлу, що передається. Вимірювання швидкості буде відбуватись таким чином: спочатку передається файл малого обсягу і визначається бітова швидкість щодо контрольного проміжку часу. Якщо тестовий файл переданий без затримок, то другим етапом буде повторення процедури з файлом більшого обсягу, і так далі до тих пір поки результати двох послідовних вимірювань не будуть одного порядку, потім результати усереднюються і виводяться оператору, як підсумкові результати вимірювання [3]. З метою підвищення точності вимірювання бітової швидкості Internet-з'єднання, а також зменшення загального часу тестування, пропонуються наступні обсяги тестових файлів (табл. 1).

Рекомендовані обсяги файлів для тестування швидкості Internet-з'єднання

Розмір тестового файлу	Призначення тесту
10 кбайт	Перевірка тестованої лінії
200 кбайт	Тестування EDGE (GPRS) з'єднань
800 кбайт	Тестування EDGE (GPRS) з'єднань (підвищена точність)
1,6 Мбайт	Тестування HSDPA/HSUPA з'єднання до 3,6 Мбайт/с
8 Мбайт	Тестування HSDPA/HSUPA з'єднання до 14,4 Мбайт/с
16 Мбайт	Тестування HSDPA/HSUPA з'єднання до 14,4 Мбайт/с (підвищена точність)

Для перевірки працездатності каналу зв'язку рекомендується використовувати обсяг тестового файлу 10 кбайт. При будь-якій якості каналу зв'язку такий малий обсяг інформації повинен передатися на тестовий сервер. Слідом можна оцінити час, за яке була здійснена передача даних. При перевищенні тимчасового проміжку, рівного 2...4 с, можна вважати тестування каналу закінченим, так як досліджуваний канал передачі даних є низько швидкісним. Обсяг даних, що дорівнює 200 кбайт використовується для тестування каналу передачі даних, який формується під час використання мережами 2G при швидкостях 384 кбіт/с EDGE (GPRS). Такий обсяг файлу дозволяє отримати верхню оцінку швидкості Internet-з'єднання. Для більш точного визначення швидкості Internet-з'єднання потрібно більший обсяг даних для того, щоб виміряти швидкість в кілька проходів. Для цього рекомендується використовувати тестовий файл обсягом даних 800 кбайт. Тестування мереж третього покоління вимагає набагато більшого обсягу даних для адекватного визначення бітової швидкості. Починати тестування в мережах WCDMA рекомендується тестовим файлом з обсягом інформації 1,6 Мбайт. При початковій швидкості передачі даних 3,8 Мбіт/с файл буде переданий за 8...10 секунд. Для більш пізніх версій стандарту HSDPA при використанні 15 каналоутворюючих кодів і модуляції 16-QAM досягається швидкість передачі даних до 14,4 Мбіт/с. При таких високих швидкостях передачі даних рекомендується використання обсягу даних 8 Мбайт, а для більш точного визначення швидкості передачі даних 16 Мбайт.

Після проведення тестового дослідження першим файлом, вибирається другий файл, далі якщо файл переданий за настільки ж короткий час, кілька етапів може бути пропущено і відразу обраний файл більшого обсягу, що дозволить більш точно визначити бітову швидкість Internet-з'єднання. За запропонованим алгоритмом обсяг тестових даних вибирається автоматично, в залежності від пропускної спроможності каналу, тому з процедури вимірювання виключається похибка оператора. Особливо актуальними є добові вимірювання, проведені в різні дні тижня. Добові вимірювання дозволяють оцінити завантаженість окремого сектора базової станції, невеликої ділянки або всієї мережі. Це необхідно для аналізу роботи мережі, а також для оптимізації проблемних її ділянок. За результатами спостереження можна виявити години максимального та мінімального навантаження, екстремум навантаження характеризується тим, що кількість абонентів, що використовують стільникову мережу для голосових викликів або для передачі даних, максимальна. У зв'язку з цим можливі випадки, коли абонентський термінал зареєстрований в мережі, але не можливо здійснити голосовий виклик або передати дані. Якщо подібний випадок поодинокий, то немає необхідності змінювати мережу або проводити оптимізацію. Однак, якщо перевантаження мережі виникає з певною періодичністю, то необхідно додати в проблемну ділянку мережі додатковий передавач або здійснити оптимізацію ділянки. Подальший безперервний моніторинг мережі повинен виявити, чи зникла проблема.

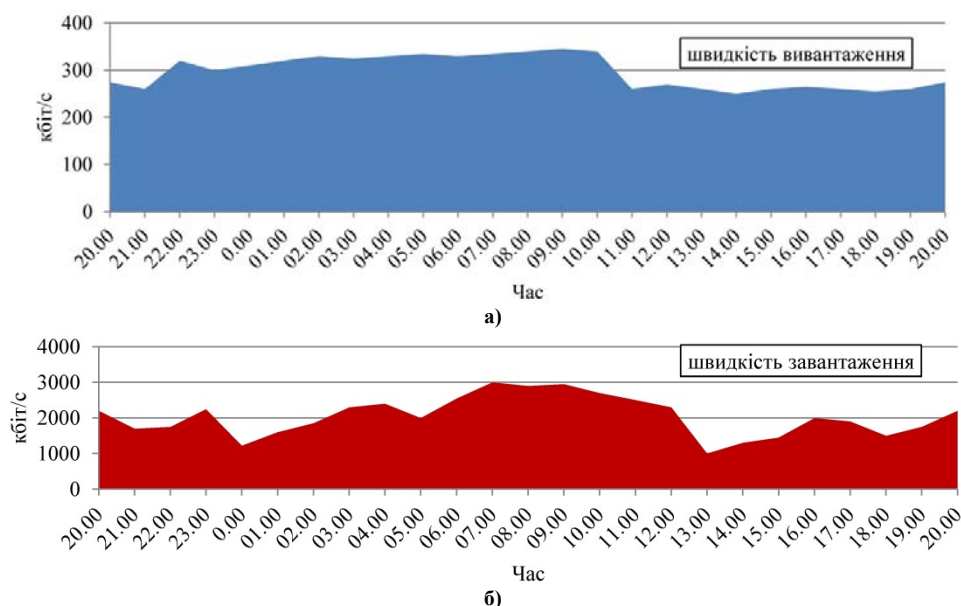


Рис. 1. Діаграми добової зміни швидкості Internet-з'єднання для вивантаження (а) та завантаження даних (б)

Години мінімального навантаження це період, в який кількість абонентів на досліджуваній ділянці мінімальна. На основі даних добового моніторингу бітової швидкості можна виявити такі години і спробувати перерозподілити ресурси в інші сектори або ділянки, де це необхідно. Діаграми добової зміни швидкості Internet-з'єднання для вивантаження (а) і завантаження (б) даних представлені на рис. 1.

З графіків видно, що мінімальна швидкість завантаження (рис. 1б) спостерігається приблизно о першій годині дня, з цього випливає, що цей момент відповідає максимальному навантаженню на мережу. Мінімальне навантаження на мережу було зафіксовано о сьомій ранку, ця експериментально визначена максимальна швидкість співпадає даними з контролера LAC. Дані з контролера про коефіцієнти завантаженості базової станції в умовних одиницях за контрольний проміжок часу представлені на рис. 2.

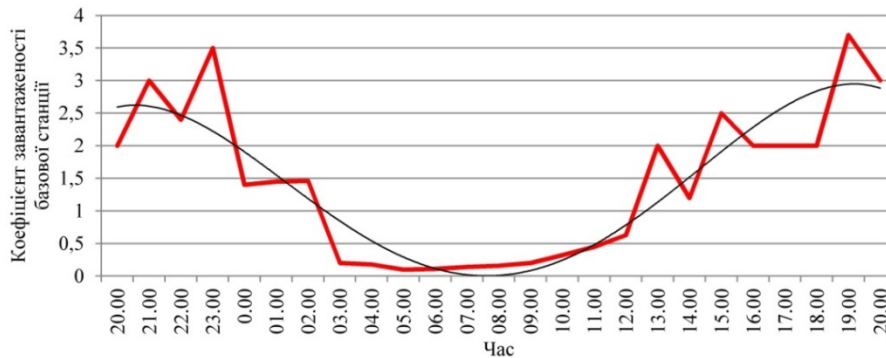


Рис. 2. Зміна коефіцієнта завантаженості базової станції за добу

Швидкість вивантаження даних штучно обмежується оператором до 300 кбіт/с. Це робиться для звільнення ресурсів мережі. Для щоденного моніторингу швидкості Internet-з'єднання в мережі стільникового зв'язку, описаний метод є досить затратним, оскільки витрачається великий обсяг трафіку. У наведеному прикладі за час тестування витрачено близько 22 Гбайт трафіку. Середню добову швидкість можна розрахувати так:

$$S_{CP} = \sum_{k=1}^n \frac{S_k}{n}, \quad (1)$$

де S_{CP} – середня добова бітова швидкість, біт/с, S_k – бітова швидкість одиничного вимірювання біт/с, n – кількість вимірювань.

У прикладі, наведеному на рис. 1б, середня добова швидкість завантаження при використанні Internet-з'єднання дорівнює 1283 кбіт/с. Для щоденного спостереження за мережею описаний метод є неефективним, так як через безперервний обмін даними відбувається велика витрата трафіку, що буде відбирати ресурси у користувачів, і відповідно в години максимального навантаження викличе збої у різних сервісах зв'язку.

Експериментальна частина

Пропонується альтернативний, пасивний спосіб визначення годин максимального і мінімальною навантаження, а також максимальних і мінімальних швидкостей Internet-з'єднання. Під час використання пасивного способу для контролю бітової швидкості Internet-з'єднання витрачається мінімальна кількість трафіку, а контроль за бітовою швидкістю можна вести постійно.

Для пояснення принципу визначення швидкості пасивним способом розглянемо принципи функціонування виділеного каналу передачі даних на фізичному рівні (DPDCH). Виділений канал передачі даних на фізичному рівні переносить інформацію високих рівнів, включаючи дані користувача, в той час як виділений канал керування на фізичному рівні (DPCCH) переносить необхідну керуючу інформацію на фізичному рівні. Швидкість передачі даних DPCCH є постійною, тоді як швидкість передачі даних DPDCH між фреймами може змінюватися [1, 5]. Для відділення сигналів одного стільника від іншого використовують скремблюючі коди, усічені послідовності Голда. Всі абонентські термінали, що знаходяться в зоні дії одного стільника, працюють на одній частоті, а для поділу інформації, що передається з абонентських терміналів на базову станцію і назад, використовуються каналізуючі коди Уолша, з коефіцієнтом ортогональності α [2]. Скремблюючі коди накладаються на каналізуючі коди, таким чином, що вони не змінюють ширину смуги сигналу, а просто дозволяють сигналам від різних джерел відділятися один від одного. При великій затримці в радіоканалі абонентський термінал буде сприймати частину сигналу передавача базової станції, як перешкоду від множинного використання. Тому на практиці отримати ідеальний ортогональний сигнал дуже складно; (типове значення $\alpha = 0,4...0,9$). Потужність сигналу на виході антени базової станції P_{TX} дорівнює:

$$P_{TX} = \frac{N_{rf} \bar{L} \sum_{j=1}^N v_j \frac{(E_b / N_0)}{W / R_j}}{1 - \eta_{DL}}, \quad (2)$$

де W – швидкість передачі чіпів, біт/с; R_j – бітова швидкість j -го АТ, біт/с; v_j – коефіцієнт активності j -го користувача на фізичному рівні, для мови – 0,67, для передачі даних – 1; \bar{L} – середнє загасання інформаційного сигналу між передавачем стільника і АТ; N – кількість АТ, що обслуговуються стільником; E_b/N_0 – енергія інформаційного біту, поділена на спектральну щільність потужності шуму; N_{rf} – потужність шуму на вхідному каскаді приймача АТ, Вт;

$$N_{rf} = N_m + NF,$$

де N_m – рівень теплового шуму. При швидкості бітів 3,84 Мчп/с; $N_m=108,2$ дБ; NF – коефіцієнт шуму приймача АТ. Типові значення $NF=5\dots 9$ дБм; $\overline{\eta_{DL}}$ – середній коефіцієнт навантаження в низхідному каналі, який можна знайти як:

$$\overline{\eta_{DL}} = \sum_{j=1}^N v_j \frac{(E_b/N_0)_j}{W/R_j} [(1-\bar{\alpha}) + \bar{i}], \quad (3)$$

де $\bar{\alpha}$ – середній коефіцієнт ортогональності сигналу передавача базової станції для j -го АТ; \bar{i} – відношення рівня радіоперешкод від іншого стільника до перешкод у власному стільнику.

Відношення E_b/N_0 визначає мінімальні вимоги до радіолінії для можливості прийому/передачі даних. Для передачі мови достатньо $E_b/N_0=5$ дБ, а для передачі даних зі швидкістю 384 Кбіт/с необхідно співвідношення $E_b/N_0=1$ дБ [3]. За допомогою (2) і (3) отримано співвідношення, що дозволяє оцінити бітову швидкість k -го терміналу R_k :

$$R_k = \frac{W \cdot P_{TX} - W \cdot P_{TX} \cdot \sum_{j=2}^N v_j \frac{(E_b/N_0)_j}{G_j} [(1-\bar{\alpha}) + \bar{i}] - W \cdot N_{rf} \cdot \bar{L} \cdot \sum_{j=2}^N v_j \frac{(E_b/N_0)_j}{G_j}}{v_k \cdot (E_b/N_0)_k \cdot [N_{rf} \cdot \bar{L} + P_{TX} \cdot ((1-\alpha_k) + \bar{i})]}, \quad (4)$$

де R_k – бітова швидкість досліджуваного терміналу, біт/с; v_k – коефіцієнт активності користувача на фізичному рівні; α_k – коефіцієнт ортогональності сигналу передавача базової станції для досліджуваного АТ; $(E_b/N_0)_j$ – енергія інформаційного біту, поділена на спектральну щільність потужності шуму для j -го АТ, разів; G_j – вираш у відношенні сигнал/перешкода під час обробки сигналів j -го АТ.

У формулі (4) k -й абонентський термінал входить в загальну кількість терміналів N , що обслуговуються одним передавачем. При цьому k -й АТ є досліджуваним, а j -і АТ є обслуговуваними тим же передавачем, але при цьому з їх кількості виключається k -й АТ, тобто k – відповідає $j = 1$. Якщо базова станція обслуговує один АТ і збережена ідеальна ортогональність кодів, вираз (4) спрощується, тому що виключається вплив всіх АТ, крім досліджуваного:

$$R_k = \frac{W \cdot P_{TX}}{v_k \cdot (E_b/N_0) \cdot [N_{rf} \cdot \bar{L} + P_{TX} \cdot ((1-\alpha_k) + \bar{i})]}, \quad (5)$$

Розрахуємо значення бітової швидкості для типових параметрів мережі. Нехай потужність базової станції P_{TX} дорівнює 16 Вт (42 дБм), потужність сигналу в приймачі АТ дорівнює 80 дБм, середнє загасання на трасі складає $(L=42+80)$ 122 дБ, спектральна щільність шуму у вхідному каскаді приймача абонентського терміналу $N_{rf} = -101$ дБм, він використовується для передачі даних, тоді $\bar{i}=0,55$, що відповідає макрокомірці з ненаправленими антенами. При таких значеннях параметрів бітова швидкість дорівнює:

$$R_k = \frac{3,84 \cdot 10^6 \cdot 16}{1 \cdot 10^{1/10} \cdot \left[10^{-101/10} \cdot 10^{122/10} + 16 \cdot ((1-1) + 0,55) \right]} \approx 3,649 \cdot 10^5 \approx 364 \text{ кбіт/с.}$$

Зі співвідношень (4) і (5) можна зробити висновок, що бітова швидкість прямо пропорційна потужності сигналу, а також обернено пропорційна втратам на радіотрасі та сигналам перешкод, що виникають через порушення ортогональності каналізуючих кодів.

$$R_k \approx \frac{W \cdot P_{TX}}{[N_{rf} \cdot \bar{L} + P_{TX} \cdot ((1-\alpha_k) + \bar{i})]}, \quad (6)$$

Порушення ортогональності виникає не тільки від багаторазового використання частоти, але також і за рахунок багатопроменевого поширення сигналу. Коли базовою станцією обслуговується один АТ, то все одно можливе порушення ортогональності кодів. На рис. 3 представлені залежності бітової швидкості R_j від коефіцієнта ортогональності сигналу α при різній потужності прийнятого сигналу, отримані шляхом математичного моделювання.

З рис. 3 видно, що бітова швидкість залежить від порушення ортогональності каналізуючих кодів, причому чим вище рівень прийнятого АТ сигналу, тим чіткіше виражається дана залежність, наприклад при рівні сигналу 75 дБм, відбувається зміна бітової швидкості на 20%, при зміні коефіцієнта ортогональності $\bar{\alpha} = 0,3 \dots 0,9$. Зі співвідношення (4) можна знайти бітову швидкість R_j як:

$$R_j = \frac{(1 - \eta_{DL}) \cdot P_{TX} \cdot W}{N_{rf} \cdot \bar{L}_j \cdot v_j \cdot (E_b / N_0)} \quad (7)$$

З виразу (7) випливає, що бітова швидкість j -го АТ буде прямувати до 0, коли η_{DL} наближається до 1 (рис. 4).

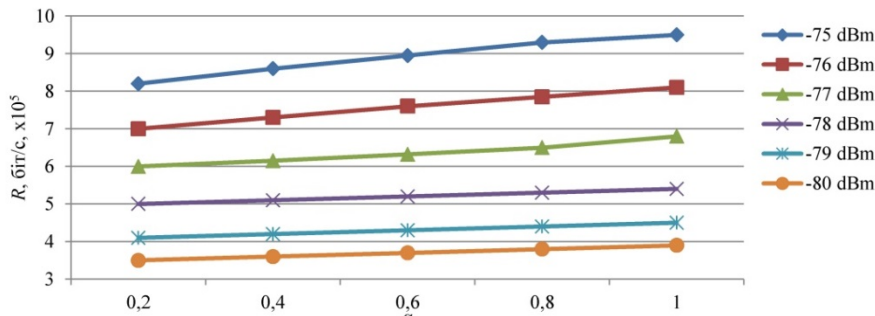


Рис. 3. Залежність бітової швидкості від коефіцієнта ортогональності досліджуваного терміналу

Згідно зі співвідношенням (3) середній коефіцієнт навантаження в низхідному каналі зростає зі збільшенням кількості абонентів, з рис. 3 видно що з ростом коефіцієнта навантаження бітова швидкість зменшується, ортогональна і інтерференційна перешкоди збільшуються. Відповідно зі зростанням загальної кількості абонентів зменшується бітова швидкість j -го АТ.

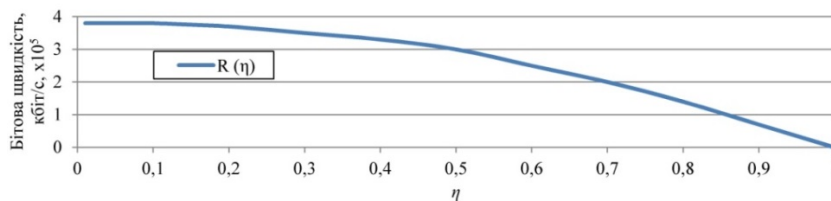


Рис. 4. Залежність бітової швидкості від коефіцієнта навантаження

Приймемо порушення ортогональності коду через багатопроменеве поширення для досліджуваного абонента рівним $\alpha_k = 0,9$, а порушення ортогональності коду через багаточисельне використання частоти будемо варіювати від 0,1 до 0,8. При цьому візьмемо типовий випадок використання мережі, коли досліджуваний термінал знаходиться в режимі передачі даних, а інші АТ використовуються для передачі голосових повідомлень. Використовуючи отримане автором співвідношення (4), проведемо моделювання зміни бітової швидкості від кількості абонентів. Результати представлені на рис. 5.

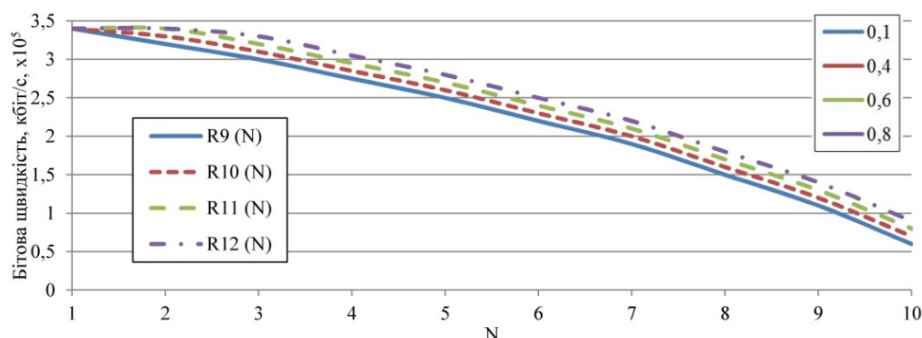


Рис. 5. Залежність бітової швидкості від кількості абонентів

З рис. 5 видно, що при збільшенні кількості активних абонентських терміналів бітова швидкість досліджуваного терміналу знижується. Даний ефект пов'язаний з тим, що збільшується коефіцієнт навантаження η_{DL} . При цьому зі збільшенням кількості абонентів, ефект від порушення ортогональності кодів збільшується, що веде до збільшення рівня перешкод.

У зв'язку з цим зміна коефіцієнта ортогональності каналізуючих кодів АТ, що обслуговуються одним передавачем базової станції, призводить до погіршення ефірної обстановки, і відповідно до зниження

бітової швидкості. Результати моделювання представлені на рис. 6.

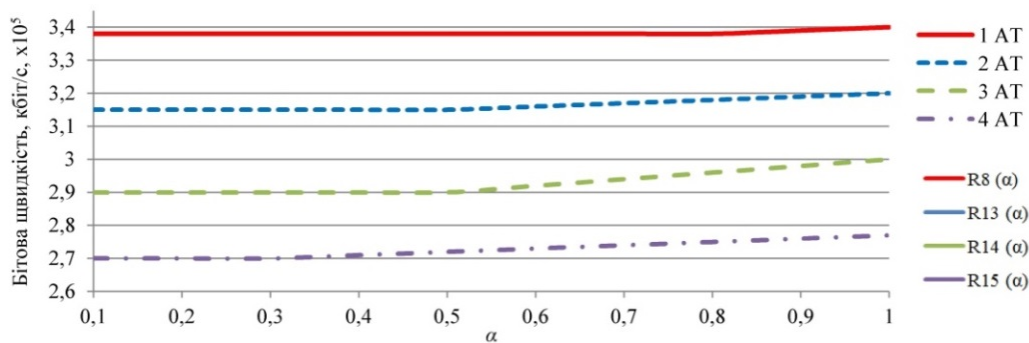


Рис. 6. Залежність бітової швидкості AT від ортогональності кодів

Бітова швидкість досліджуваного терміналу залежить від порушення ортогональності кодів досліджуваного терміналу, викликаного багатопроменевим поширенням сигналу, а також порушення ортогональності кодів інших абонентських терміналів, викликаного багаточисельним використанням частоти. При цьому порушення ортогональності кодів абонентських терміналів вносить додаткову складову перешкод в загальну ефірну обстановку досліджуваного сектору базової станції. Відповідно, якщо провести один раз в заданий проміжок часу моніторинг швидкості методом передачі файлу на ftp-сервер, встановити максимальну можливу швидкість для заданого місця, а потім проводити пасивний моніторинг швидкості з нормуванням отриманих результатів за максимальним значенням, то можна отримати добовий розподіл зміни швидкості Internet-з'єднання без витрати величезної кількості трафіку. Також даний спосіб дозволить не займати ресурси радіолінії та контролера, а також не вносити шумових перешкод в досліджуваний сектор, що при тривалих вимірюваннях істотно розвантажить стільникову мережу.

Порівняємо результати, отримані за допомогою активного та пасивного способів вимірювання швидкості Internet-з'єднання. На рис. 7 на одній діаграмі представлені результати добових вимірювань бітової швидкості та розрахункові значення бітової швидкості. З рисунка видно, що години максимального навантаження визначені активним і пасивним способом знаходяться в один час. Теж саме можна сказати і про години мінімального навантаження, вони також визначаються в однаковий час. Можна помітити, що характер поведінки залежностей збігається, точки перегину ділянки спадання і ділянки зростання збігаються на діаграмах, отриманих різними способами.



Рис. 7. Розрахункове та експериментальне значення бітової швидкості

Також варто відзначити, що даний спосіб призначений в основному для постійного моніторингу систем стільникового зв'язку в частині спостереження за бітовою швидкістю Internet-з'єднання.

Висновки

Основна задача дослідження бітової швидкості пасивним способом – це виявлення тенденцій в поведінці користувачів, а саме виявлення годин максимального та мінімального навантаження на базові станції.

При проведенні добових вимірювань в мережах стільникового зв'язку більш важлива динаміка досліджуваного процесу, ніж точність вимірювань. Важливо виявити моменти, коли бітова швидкість починає зменшуватися або зростати, це важливо для внесення корекції в роботу мережі, тим самим підтримуючи якість послуг на високому рівні. На основі даних про динаміку зміни бітової швидкості з'являється можливість динамічно перерозподіляти ресурси мережі. Наприклад протягом доби в години мінімального навантаження можна зменшувати потужність передавача, тим самим заощаджуючи електроенергію. При використанні динамічного режиму на одній базовій станції ефект економії електроенергії малопомітний, але при використанні динамічного режиму мережі в цілому дає значний економічний ефект. Наприклад енергоспоживання базової станції становить 500 Вт·год. Нехай при зниженні

потужності передавача в 2 рази загальне енергоспоживання керуючих і охолоджуючих систем складе 300 Вт·год. Розрахуємо загальну кількість спожитої електроенергії за місяць по дням, результати моделювання представимо у вигляді графіків на рис. 8.

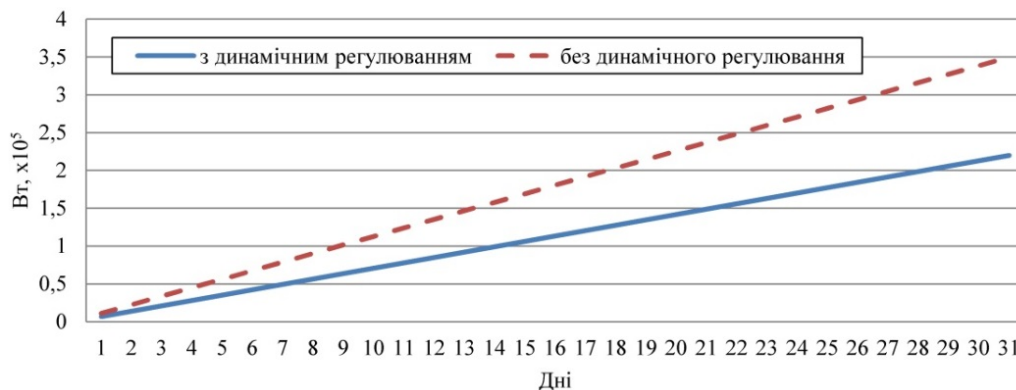


Рис. 8. Сумарне енергоспоживання базової станції

З рисунку видно, що сумарне енергоспоживання однієї базової станції без динамічного регулювання потужністю становить 0,35 МВт на добу, а з динамічним регулюванням становить 0,2 МВт на добу. Економія електроенергії від однієї базової станції може становити до 150 кВт на добу. У одного оператора стільникового зв'язку в регіоні нараховується близько 150–200 базових станцій. Таким чином сумарна економія електроенергії становить від 22,5 МВт до 30 МВт в місяць. Таким чином використання динамічного регулювання потужністю дозволяє знизити енергоспоживання, тим самим знизити тепловиділення та покращити умови експлуатації базових станцій операторів стільникового зв'язку.

Література

1. Holma N. W-CDMA for UMTS / N. Holma / John Wiley & Sons. – 2004. – 445 p.
2. Naworocki M. Understanding UMTS radio network. Modelling, planning and automated optimization / M. Naworocki, M. Dohler, A. Aghvami // John Wiley & Sons Ltd. – 2006. – 500 p.
3. Рерле Р. Д. Протоколи GPRS и их тестирование / Р. Д. Рерле, И. М. Ехриель И. В. Данилов // Сети и системы связи. – 2002. – № 12.
4. Якимчук Н. М. Кореляційно-регресійний аналіз інформаційних мереж з нестационарним трафіком / Н. М. Якимчук, П. О. Станко // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції молодих учених «Актуальні проблеми інформаційних технологій: АРІТ-2018», 20-21 листопада 2018 р., м. Київ. – С. 128–130.
5. Якимчук Н. М. Характеристика системи тактової мережевої синхронізації для оцінки часу затримки мережі / Н. М. Якимчук, В. В. Олянський // Дванадцята міжнародна конференція «Проблеми телекомунікацій» на базі Інституту телекомунікаційних систем і НДІТ НТУУ «КПІ», 16–20 квітня 2018 р., м. Київ. – С. 107–110.

References

1. Holma N. W-CDMA for UMTS / N. Holma / John Wiley & Sons. – 2004. – 445 p.
2. Naworocki M. Understanding UMTS radio network. Modelling, planning and automated optimization / M. Naworocki, M. Dohler, A. Aghvami // John Wiley & Sons Ltd. – 2006. – 500 p.
3. Rerle R. D. Protokoly GPRS i ih testirovanie / R. D. Rerle, I. M. Ehriel' I. V. Danilov // Seti i sistemy svjazi. – 2002. – № 12.
4. Yakymchuk N. M. Koreliatsiino-rehresiinyi analiz informatsiinykh merezh z nestatsionarnym trafikom / N. M. Yakymchuk, P. O. Stanko // Materialy mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsiia molodykh uchenykh «Aktualni problemy informatsiinykh tekhnolohii: ARIT-2018», 20-21 lystopada 2018 r., m. Kyiv. – S. 128–130.
5. Yakymchuk N. M. Kharakterystyka systemy taktovoi merezhevoi synkhronizatsii dlia otsinky chasu zatrymky merezhi / N. M. Yakymchuk, V. V. Olianskyi // Dvanadtsiata mizhnarodna konferentsiia «Problemy telekomunikatsiinykh system i NDIT NTUU «KPI», 16–20 kvitnia 2018 r., m. Kyiv. – S. 107–110.

Рецензія/Peer review : 19.2.2019 р.

Надрукована/Printed : 10.4.2019 р.

Рецензент: д. ф.-м. наук., проф. Пастернак Я. М.

Т. М. МАНСУРОВ

Азербайджанский технический университет, г. Баку

Р. А. ГАНИФАЕВ

Национальная академия авиации, г. Баку

СТАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ВХОДЯЩЕГО ПОТОКА ВЫЗОВОВ В SOFTSWITCH

В статье отмечено, что пропускная способность пучка каналов связи зависит от статистических свойств потока вызова, т.е. от структуры пучка и его емкости, а также от требуемого качества обслуживания или нормы потерь. С этой целью проведены измерения статистических характеристик входящего потока вызовов, поступающего в Softswitch. На основе полученной статистики характеристики входящего потока вызовов определены параметры Херста самоподобия при различных количествах каналов с помощью программы Self-Similarity Analysis. Установлено, что самоподобие потока вызовов обладает пачечным характером и сохраняет свой пачечный характер при агрегировании и сложении нескольких потоков вызовов в пучке каналов Softswitch. С помощью достоверного измерения потока вызовов возможно создание надежной информационной основы для управления эксплуатацией и локализацией отказов оборудования, а также для мониторинга и технического обслуживания в планировании и проектировании Softswitch. В современных коммутационных системах распределения информации с пакетной передачей входящий поток вызовов является пачечным и обладает так называемым свойством самоподобия. Свойство самоподобия еще больше усложняет задачу, поскольку пачечный характер потока вызовов, обладающий этим свойством, сохраняет свою пачечность при агрегировании и сложении нескольких потоков в пучке каналов. Благодаря точному определению параметра Херста самоподобия можно повышать качество обслуживания и пропускную способность пучков соединительных линий и каналов Softswitch.

Ключевые слова: пропускная способность, мониторинг, коммутация, входящий поток, самоподобие, параметр Херста.

T. M. MANSUROV

tofiq-mansurov@rambler.ru

Azerbaijan Technical University, Baku

R. A. GANIFAYEV

rashad_hanifayev@mail.ru

National Academy of Aircraft, Baku

THE STATIC ANALYSIS OF CHARACTERISTICS OF THE ENTERING STREAM OF CALLS OF SOFTSWITCH

In article it is noted that the capacity of a bunch of communication channels depends on statistical properties of a stream of a call, i.e. on structure of a bunch and its capacity and also on the required quality of service or norm of losses. Measurements of statistical characteristics of the entering stream of calls coming to Softswitch are for this purpose taken. On the basis of the received statistics of characteristic of the entering stream of calls Hurst's parameters of self-similarity at various number of channels are determined by the Self-Similarity Analysis program. It is established that self-similarity of a stream the call has kidney character and keeps the kidney character at aggregation and addition of several streams of calls in a bunch of Softswitch channels. By means of reliable measurement of a flow of calls, creation of a reliable information basis for management of operation and fault localization of the equipment and also for monitoring and technical maintenance in planning and design of Softswitch is possible. In modern switching information distribution systems with packet forwarding the entering flow the call is kidney and has so-called property of self-similarity. The property of self-similarity complicates even more a task as the kidney nature of a flow of calls having this property saves the tamping at aggregation and addition of several flows in a bunch of channels. Thanks to exact determination of parameter of Hurst of self-similarity it is possible to increase quality of service and throughput of trunk groups and Softswitch channels.

Key word: throughput, monitoring, switching, the entering flow, self-similarity, Hurst's parameter.

Введение. Проектирование на основе достоверных измеряемых исходных данных и метода расчета, учитывающего характер потока вызова и законы распределения его основных параметров, позволит обеспечить ощутимую экономию средств на строительство и эксплуатацию сетей нового поколения. Благодаря более точному расчету повысится качество обслуживания и пропускная способность пучков соединительных линий и каналов связи. При системном подходе к проблеме повышения качества предоставляемых информационных услуг в современных коммутационных системах распределения информации, таких как Softswitch, невозможно обойтись без надежных методов анализа качества обслуживания вызовов в реальных условиях формирования их потоков и с учетом свойств самоподобного характера.

Актуальность работы. Пропускная способность пучка каналов связи зависит от статистических свойств потока вызова, структуры пучка и его емкости, а также от требуемого качества обслуживания или нормы потерь. Принято считать, что поступающий на обслуживание в систему коммутации поток является простейшим или пуассоновским потоком. Для него промежутки времени между вызовами имеют показательный закон распределения. Если интервалы между вызовами имеют показательное распределение, то число таких событий в единицу времени имеет распределение Пуассона. Основные статистические характеристики потока являются следующими – математическое ожидание числа вызовов за единицу

времени, дисперсия и среднее квадратическое отклонение. Однако, продолжительные наблюдения и исследования реальных потоков вызовов на различных телекоммуникационных сетях, в том числе в сетях NGN [1] показали некоторое отличие измеренных статистических данных от основных характеристик теоретических законов распределения. Другими словами, что в современных коммутационных системах распределения информации с пакетной передачей входящий вызов является пачечным и обладает так называемым свойством самоподобия. В статье оцениваются параметры входящего потока вызова Softswitch и на основе их соответствия самоподобию (показатель Херста) при различных количествах каналов с помощью программы Self Similarity Analysis [2].

Измерение статистических характеристик потоков вызовов Softswitch. Измерение трафика иначе именуется измерением полезной нагрузки или измерением рабочих характеристик. Имеются в виду различные измерительные операции, выполняемые в системах softswitch и в сетях связи с целью получения данных по таким предметам измерений, как текущее состояние; информация о сигнализации; информация о пользователях системные ресурсы. Эти измерения имеют целью создание надежной информационной основы для управления эксплуатацией и для локализации отказов оборудования, а также для мониторинга и технического обслуживания, для планирования и проектирования сетей. Обслуживание поступающего в пучки каналов Softswitch потока вызовов подразумевает установление соединения. Среди установленных соединений могут быть успешные, которые окончились разговором, и безуспешные – из-за занятости или не ответа вызываемого пользователя. Существуют также соединения, не установленные из-за потерь в коммутационной системе или недоступности какого-либо из участков сети («частично установленные»). Перечисленные варианты обслуживания характеризуются следующими параметрами [3]:

- доля вызовов, окончившихся разговором,
- доля вызовов, окончившихся неответом,
- доля вызовов, окончившихся слушанием сигнала «Занято»,
- доля вызовов, не окончившихся разговором из-за ошибок в процессе набора номера,
- доля вызовов, окончившихся не прохождением по техническим причинам.

Вызовы в пучки каналов Softswitch поступают как с телефонной сети общего пользования (ТФОП) (рис. 1).

(рис. 1).

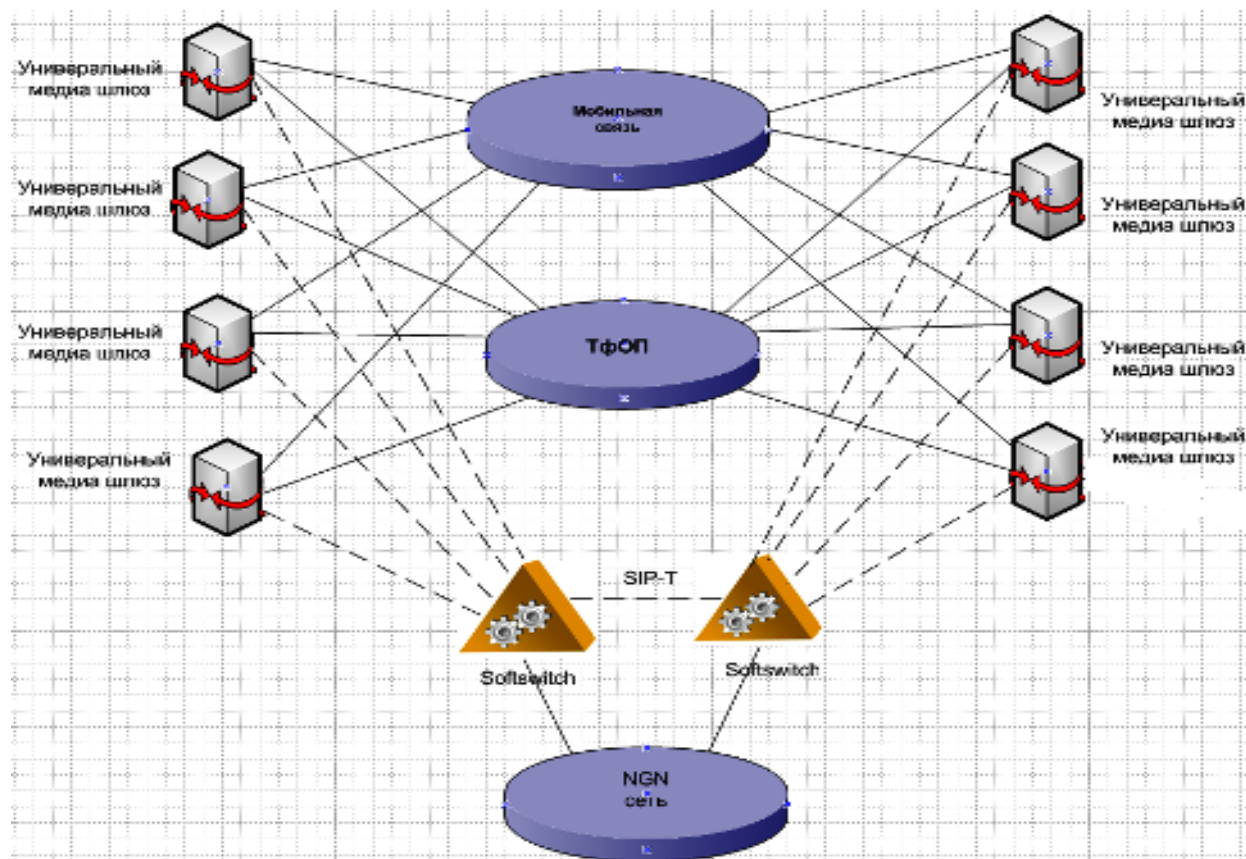


Рис. 1. Вызовы, поступающие с телефонной сети общего пользования ТФОП

Для проведения анализа потока вызовов, поступающей в пучки каналов Softswitch, сначала были сняты статистические данные с сервера о вызовах, поступающих от различных пользователей сети связи:

- число попыток вызовов в определенном стационарном направлении;
- число получивших ответ вызовов в определенном стационарном направлении;
- число сбоев выбора маршрута в определенном стационарном направлении вследствие занятости

всех каналов.

В табл. 1 приведены отчеты о статистических параметрах входящего потока вызовов в Softswitch по суткам недели.

Таблица 1

Отчеты о статистических параметрах входящего потока вызовов в Softswitch по суткам недели

Временной интервал	Число попыток вызовов в определенном станционном направлении				Число получивших ответ вызовов в определенном станционном направлении				Число сбоев выбора маршрута в определенном станционном направлении вследствие занятости всех каналов			
	30 каналов	60 каналов	90 каналов	120 каналов	30 каналов	60 каналов	90 каналов	120 каналов	30 каналов	60 каналов	90 каналов	120 каналов
Дни недели												
Понедельник	5987	10287	4681	10687	3789	6287	2735	5658	58	95	19	62
Вторник	6157	10323	4523	10415	3828	6485	2926	5844	69	110	22	69
Среда	6280	10466	4490	10155	3846	6392	2959	5939	46	123	28	59
Четверг	6326	10392	4708	10569	3883	6368	3101	5959	66	98	35	65
Пятница	6336	10260	4625	11088	3832	6276	3089	6290	68	114	32	72
Суббота	5669	9575	4386	9681	3576	6214	2829	5375	63	88	25	53
Воскресенье	5123	8486	3842	8983	3261	5529	2697	5274	52	63	17	41

Исследование самоподобного входящего потока вызова Softswitch. Первые о самоподобном телетрафике заговорили с момента его обнаружения в 1993 году группа ученых (W. Leland, M. Taqqu, W. Willinger и D. Wilson), которые исследовали Ethernet-трафик в сети корпорации Bellcore и обнаружили, что он обладает свойством самоподобия, т.е. выглядит качественно одинаково при почти любых масштабах временной оси [4]. При этом оказалось, что в условиях самоподобного трафика методы расчета современных компьютерных сетей (пропускной способности каналов, емкости буферов и пр.), основанные на пуассоновских моделях и формулах Эрланга, которые с успехом используются при проектировании телефонных сетей, дают неоправданно оптимистические решения и приводят к недооценке реальной нагрузки. Ситуация, сложившаяся в современных системах распределения информации, наличие большого количества сетевых услуг, на которых периодически возникают резкие колебания запросов в передаче данных и большие потери потока вызовов, появления интеграций новых коммутационных систем, необходимость обеспечения высокого качества обслуживания приложений, делают актуальным статистический анализ потока вызовов. Характеристики трафика в данных сетях хорошо изучены, а также разработаны строгие методики расчетов. В основу в современных коммутационных системах распределения информации, как правило, был положен принцип коммутации пакетов, а методики расчетов, возможно, вследствие некоторого отставания теоретической базы от бурно развивающихся технологий остались практически теми же, что и привело к возникновению «проблемы самоподобия». Кроме того, в настоящее время все большее распространение получают способы передачи речевой информации по сетям с коммутацией пакетов VoIP, ОКС№7, трафик которых также является самоподобным [5]. Важнейшим параметром, характеризующим степень самоподобия, является параметр Херста (Hurst) H . Для доказательства самоподобности генерируемого трафика используется метод абсолютных моментов. В качестве значений случайного процесса рассматривается количество требований, поступающее в коммутационную систему распределения информации в единицу времени. Исходная последовательность количества требований длиной N разделяется на блоки длиной m (отдельные агрегированные процессы размером m). На непересекающихся временных интервалах, т.е. на границах каждого блока k последовательность имеет среднее значение:

$$X_k^{(m)} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m X_{(k-1)m+j}, \quad k = \overline{1, [N/m]} \quad (1)$$

Рассчитав среднее значение \bar{X} для всей последовательности, затем для каждого блока k рассчитываем дисперсию D_k :

$$D_k^{(m)} = \frac{1}{N/m} \sum_{j=1}^m (X_k^{(m)} - \bar{X})^2. \quad (2)$$

Для самоподобного процесса дисперсия агрегированных процессов должна убывать медленнее, чем величина, обратная размеру выборки m [6]. Для выявления этого свойства необходимо построить дисперсионно-временной график зависимости дисперсий агрегированных процессов от степени агрегирования m . Поскольку Херстом было показано, что:

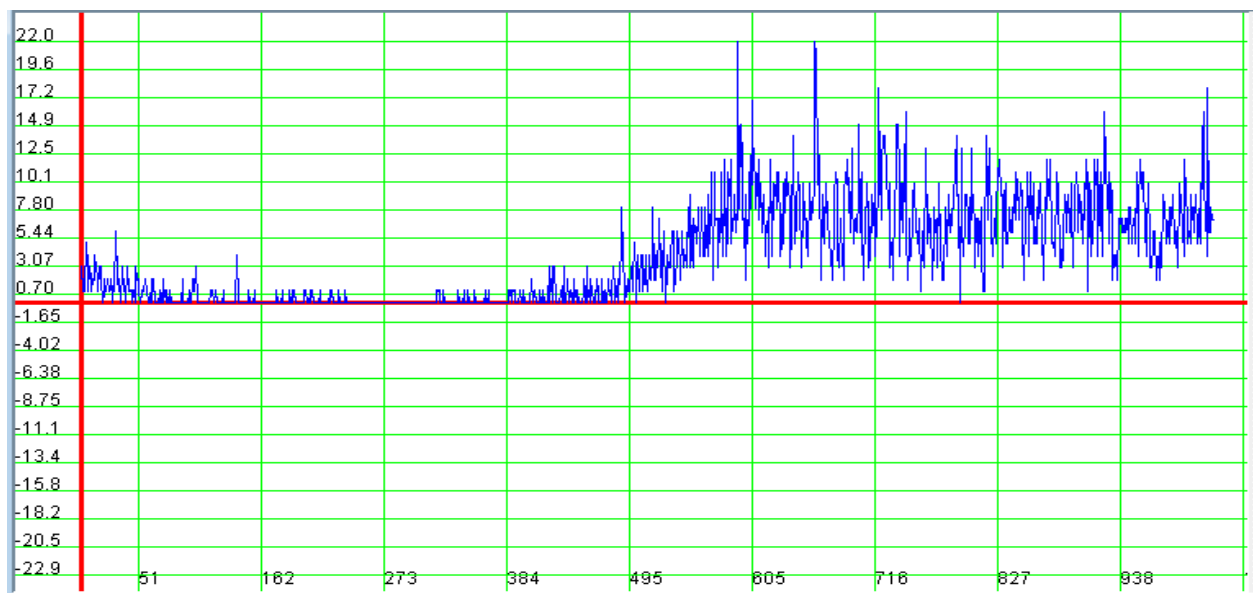
$$\log \left(\frac{\max D - \min D}{D_k^{(m)}} \right) \approx H \log \left(\frac{N}{2} \right), \quad (3)$$

то график этой зависимости строится в логарифмическом масштабе. Выражение в левой части уравнения (3) $\frac{\max D - \min D}{D_k^{(m)}}$ называется R/S статистикой или нормированным размахом. Используя значение

показателя Херста H , выделяют три типа случайных процессов:

- $0 \leq H \leq 0,5$ – случайным процесс является антиперсистентным, или эргодическим, рядом, который не обладает самоподобием;
- $H = 0,5$ – полностью случайный ряд, аналогичный случайным смещениям частицы при классическом броуновском движении;
- $H > 0,5$ – персистентный (самоподдерживающийся) процесс, который обладает длительной памятью и является самоподобным.

Таким образом, самоподобный вероятностный процесс характеризуется значениями параметра Херста, ограниченными строгим неравенством $0,5 < H < 1$ [6, 7].



Полученные численные значения параметра Херста для исследуемого входящего потока вызовов в Softswitch при различных количествах каналов по суткам недели сведены в табл. 2.

Таблица 2

Численные значения параметра Херст входящего потока вызовов в Softswitch при различных количествах каналов по суткам недели

Временной интервал	Параметры Херста, H			
	30 каналов	60 каналов	90 каналов	120 каналов
Понедельник	0.76	0.73	0.76	0.77
Вторник	0.76	0.71	0.77	0.75
Среда	0.73	0.73	0.77	0.74
Четверг	0.75	0.76	0.79	0.75
Пятница	0.74	0.73	0.78	0.68
Суббота	0.72	0.765	0.74	0.77
Воскресенье	0.72	0.71	0.77	0.77

Заключение. Полученные результаты проведенных измерений потока вызовов, поступающих в Softswitch, позволяют создать надежную информационную базу для управления эксплуатацией и локализацией отказов оборудования, а также для мониторинга и технического обслуживания в планировании и проектировании Softswitch. В современных системах коммутации и распределения информации с пакетной передачей, входящий поток вызов тоже является пачечным и обладает так называемым свойством самоподобия. Свойство самоподобия еще больше усложняет задачу, поскольку пачечный характер поток вызов, обладающий этим свойством, сохраняет свой пачечный характер при агрегировании и сложении нескольких потоков в пучке каналов. Точное определение параметра Херста самоподобия позволяет повысить качество обслуживания и пропускную способность пучков соединительных линий и каналов Softswitch.

Литература

1. Ложковский А.Г. Методы расчета качества обслуживания в мультисервисных сетях связи / А.Г. Ложковский // The 2-nd International Conference «Telecommunication, Electronics and Informatics». – Chishinau, 2008. – С. 117–126.
2. <http://www.cs.ucr.edu/~tkarag/Selfis/Selfis01b.zip>

3. Руководство по эксплуатации – Измерение трафика. Система SoftSwitch U-SYS SoftX3000.
4. Leland W. On the Self-Similarity of Ethernet Traffic / W. Leland, M. Taqqu, W. Willinger and D. Wilson // IEEE / ACM. Transactions of Networking. – 1994. – Vol. 2, № 1. – P. 1–15. – DOI: 10.1109/90.282603.
5. Криштофович А.Ю. Самоподобный случайный процесс как модель трафика сети ОКС №7 / А.Ю. Криштофович // Информатика, радиотехника, связь. – Самара, 2002. – № 7. – С. 17–19.
6. Крылов В.В. Теория телетрафика и её приложения / В.В. Крылов, С.С. Самохвалов. – СПб : БХВ-Петербург, 2005. – 288 с. : ил.
7. Ложковский А.Г. Оценка параметров качества обслуживания самоподобного трафика энтропийным методом / А.Г. Ложковский, Р.А. Ганифаев // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2008. – № 1. – С. 57–62.

References

1. Lozhkovskij A.G. Metody rascheta kachestva obsluzhivaniya v multiserwisnyh setjah svjazi / A.G. Lozhkovskij // The 2-nd International Conference «Telecommunication, Electronics and Informatics». – Chishinau, 2008. – S. 117–126.
2. <http://www.cs.ucr.edu/~tkarag/Selfis/Selfis01b.zip>
3. Rukovodstvo po jekspluatácii – Izmerenie trafika. Sistema SoftSwitch U-SYS SoftX3000.
4. Leland W. On the Self-Similarity of Ethernet Traffic / W. Leland, M. Taqqu, W. Willinger and D. Wilson // IEEE / ACM. Transactions of Networking. – 1994. – Vol. 2, № 1. – P. 1–15. – DOI: 10.1109/90.282603.
5. Krishtofovich A.Ju. Samopodobnyj sluchajnyj process kak model' trafika seti OKS №7 / A.Ju. Krishtofovich // Informatika, radiotekhnika, svjaz'. – Samara, 2002. – № 7. – S. 17–19.
6. Krylov V.V. Teorija teletrafika i ejo prilozhenija / V.V. Krylov, S.S. Samohvalov. – SPb : BHV-Peterburg, 2005. – 288 s. : il.
7. Lozhkovskij A.G. Ocenka parametrov kachestva obsluzhivaniya samopodobnogo trafika jentropijnym metodom / A.G. Lozhkovskij, R.A. Ganifaev // Naukovi praci ONAZ im. O.S. Popova. – 2008. – № 1. – S. 57–62.

Рецензія/Peer review : 24.2.2019 р.

Надрукована/Printed : 10.4.2019 р.

Рецензент: д. т. н., проф. Мамедов Ф. Г.

ДЕЯКІ ОСОБЛИВОСТІ ВІРТУАЛІЗАЦІЇ СУЧАСНОГО ІНФОРМАЦІЙНОГО СУСПІЛЬСТВА

У статті розглядаються основні особливості віртуалізації сучасного інформаційного суспільства, суть віртуалізації та роль комунікаційного середовища як рушія розвитку суспільства. Коротко охарактеризовано наслідки інформатизації способу життя людей.

Ключові слова: віртуалізація, комунікаційна мережа, інформаційний простір, інформаційне середовище, мережеве суспільство.

V. TS. MIKHALEVSKIY, G. I. MIKHALEVSKA
Khmelnitskyi National University

SOME FEATURES OF VIRTUALIZATION OF MODERN INFORMATIONAL SOCIETY

In connection with the development of IT virtualization becomes the main socio-psychological characteristics of the global information society. The main categories of "virtual", "virtual" and "virtual reality" are focused on creating an imaginary reality that does not coincide with the reality and the one that it generates. The growing demand and popularity of cyberspace is determined not only by its huge information resources, but also by its communicative capabilities. If, initially, the Internet was seen as a way of communicating elements of information, but now on the forefront it is an ability to connect people. Today, the evolution of the creation and formation of a multidimensional information communication environment is a determining factor in the innovative development and effective functioning of all structures and social systems of the information society. It is through the communication sphere that is transformed under the conditions of global information opportunities, freedom of access to knowledge, communication between people and communities, accumulation, dissemination and enrichment of social experience are provided. The process of virtualization, due to the development of the latest ICT, covers a significant part of the social consequences of informatization and is considered as one of the socio-psychological characteristics of the global information society. At the same time, informatization has other consequences that are not "covered" by the virtualization process. The nature of the social consequences and the dynamics of virtualization varies depending on socio-cultural, political, economic and other characteristics of the environment in which this process extends. In addition, the virtualization process does not have a social impact in isolation, but is in close interweaving with other factors (for example, the development of international tourism or migration) that can change the strength and nature of its impact.

Keywords: virtualization, communication network, information space, information environment, network society.

Постановка проблеми. Розвиток сучасного інформаційного суспільства тісно пов'язаний із його віртуалізацією, тобто з впливом аудіовізуальних мас-медіа та мережі Інтернет на суспільні відносини. В широкому значенні, віртуальна реальність трактується як вдаваний світ, створений в уяві користувача. Тому, у зв'язку з розвитком ІТ, віртуалізація стає основною соціально-психологічною характеристикою глобального інформаційного суспільства. Основні категорії «віртуальний», «віртуальність» і «віртуальна реальність» орієнтовані на створення уявної реальності, що не співпадає з існуючою реальністю та тією, що вона породжує. Зростаюча затребуваність і популярність кіберпростору визначається не стільки його величезними інформаційними ресурсами, скільки комунікативними можливостями. Якщо спочатку мережа Інтернету розглядалася як спосіб зв'язку елементів інформації, то зараз на перший план виходить її здатність зв'язувати людей.

Надзвичайно широкі інтерактивні можливості кіберпростору сприяють тому, що йде процес переміщення різних видів соціальної діяльності і соціальної взаємодії з реальності існуючої («офф-лайн») у віртуальну – кіберпростір [1]. Проте така властивість кіберпростору веде до зміни ментальності людини: сутність людини відчужується вже не в соціальну, а у віртуальну реальність. Перспектива того, що відносини між людьми візьмуть форму відносин між образами, і є перспектива віртуалізації суспільства. У цій перспективі з'являється можливість трактувати суспільні зміни, розрізняючи старий і новий типи соціальної організації за допомогою дихотомії «реальне / віртуальне».

Формулювання цілей статті (постановка завдання). Дослідити основні особливості процесу віртуалізації, що обумовлений розвитком новітніх інформаційно-комунікаційних технологій (ІКТ), та охарактеризувати наслідки процесу віртуалізації.

Виклад основного матеріалу. Початок ХХІ ст. характеризується реформуванням і модернізацією всіх соціально-комунікативних сфер діяльності (науки, політики, культури, економічних, трудових відносин тощо), важливими особливостями яких є процеси інформатизації. Нині еволюційність створення і формування багатогранного інформаційного комунікаційного середовища є визначальним чинником інноваційного розвитку й ефективного функціонування всіх структур та соціальних систем інформаційного суспільства. Саме через комунікаційну сферу, що трансформується за умов глобальних інформаційних можливостей, забезпечуються свобода доступу до знань, зв'язки між людьми і спільнотами, накопичення, поширення та збагачення соціального досвіду [1, 2, 3].

В наш час пристрасть до технізації комунікацій так далеко зайшла в своєму пануванні над природними способами спілкування, що з її допомогою можуть бути знищені початкові умови існування суспільства. Кіберсуб'єкт відображає атрибути свого внутрішнього світу в актах комунікації, які нумерізуються в інформаційних системах.

Світові та українські науковці, такі як В. П. Андрущенко, В. М. Бебик, В. О. Данільян, В. О. Ільганаєва, Ю. М. Канигін, В. З. Коган, В. А. Михайлов, Г. Г. Почепцов, Б. А. Родіонов, Є. А. Сєдов,

А. В. Соколов, А. Д. Урсул, Ф. І. Шарков та ін., розглядають переважно соціологічні, філософські аспекти природи комунікацій, функції, співвідношення соціальних структур суспільства і результати людської діяльності з урахуванням різноманітних комунікативних засобів комунікації (взаємозв'язки, повідомлення, обмін інформацією, вплив на суспільство в цілому). Так, однією із проблем еволюції комунікаційного середовища вони вважають передумови його формування в контексті інформаційного суспільства, інформаційно-комунікаційної техноструктури, розвитку глобальних мережевих Інтернет-комунікацій (рис. 1).



Рис. 1. Передавання інформації в межах комунікаційної системи

В основі концепції мережевого суспільства лежить уявлення про інформацію як знання, що породжує конструктивні зміни системи. Комп'ютерні технології надають нові обриси поняттю мережі: мережа – це не тільки спосіб транспортування інформації, але і можливість її обробки. Інтегральні мережі комунікаційних взаємодій ЕОМ створили особливу форму розподіленої комунікації, яку виявилось можливим спроектувати на соціальну комунікацію. Включені в автоматизовані комунікаційні процеси люди, які обслуговують ці мережі і підлеглі заданим технологічним нормам, стали комунікаційно відтворювати цю систему у власному спілкуванні.

Теорія мережі дозволяє соціальному досліднику по-новому поглянути на суспільство. Більш того, можна стверджувати, що вона призводить до зміни кута зору на суспільство. В описаних теоретичних підходах до створення теорії мережі те загальне, яке можна виокремити, полягає в постановці в центр уваги соціальної комунікації, соціальних контактів. Кожне соціальне явище трактується як сукупність «повідомлень», здатних транслюватися, накопичуватися, віртуалізувати і т.д. Інформатизація суспільства стає одним з головних чинників соціокультурної динаміки в світі. Як підкреслюється в Окинавській Хартії глобального інформаційного суспільства від 22 липня 2000 року «інформаційно-комунікаційні технології є одним з найбільш важливих факторів, що впливають на формування суспільства XXI століття. Їх революційний вплив стосується способу життя людей, їх освіти та роботи, а також взаємодії уряду та громадянського суспільства».

Процес віртуалізації, обумовлений розвитком новітніх ІКТ, охоплює значну частину соціальних наслідків інформатизації і розглядається як одна з соціально-психологічних характеристик глобального інформаційного суспільства. У той же час інформатизація має й інші наслідки, що не «покриваються» процесом віртуалізації. Характер соціальних наслідків і динаміка віртуалізації варіюється залежно від соціокультурних, політичних, економічних та інших характеристик того середовища, в якому поширюється даний процес. Крім того, процес віртуалізації надає соціальний вплив не ізольовано, а в тісному переплетенні з іншими факторами (наприклад, розвитком міжнародного туризму або міграції), які можуть змінювати силу і характер його впливу.

Соціальні наслідки процесу віртуалізації можна коротко охарактеризувати стосовно до основних сфер життя суспільства: а) символічний аспект: телебачення та Інтернет займають лідируючі позиції як джерело отримання людьми суспільно значимої інформації. Завдяки мас-медіа та Інтернету у людей з'являються небачені раніше можливості по вивченню і вибору різних форм організації життєдіяльності: життєвих стилів, релігійних вірувань, поведінкових стереотипів, внаслідок чого відбувається індивідуалізація і плюралізація соціального життя. Як зазначає І. Г. Каргіна, «розвиток комунікаційних технологій надав індивіду можливість вільного самостійного вибору з широкого спектру релігійних і моральних альтернатив, конструювання індивідуальної специфічної системи релігійних цінностей». б) інтерактивний аспект: під впливом Інтернету та інших ІКТ формується передвіщене М. Маклюєном «глобальне село» з притаманною для нього можливістю мобільної комунікації між самими віддаленими точками на нашій планеті, що породжує комплекс наслідків у всіх сферах життя національних товариств і світової спільноти в цілому.

Територіально розподілена децентралізована організація мережі Інтернет транслюється в соціальну структуру, створюючи різні форми мережевих спільнот, причому мова йде не тільки про соціальні мережі, але й розвиток соціальних взаємозв'язків мережевого типу різних суб'єктів за межами кіберпростору, починаючи від неурядових організацій і закінчуючи терористичними формуваннями. Соціальні мережеві технології сприяють появі нових форм соціально групової взаємодії. Одним з найбільш яскравих серед них є флеш-моб (flashmob), під яким розуміється короткочасна масова акція, що, як правило, не має певної мети і організована за допомогою Інтернету або мобільного зв'язку: люди збираються в умовленому місці,

виконують певні, задалегідь обумовлені дії, і швидко розходяться. Дослідник Г. Рейнольд, аналізуючи наслідки поширення мобільних ІКТ, сформулював концепцію «розумного натовпу» («smartmob»), члени якої складаються з людей здатних діяти узгоджено, навіть не знаючи один одного, завдяки використанню таких технологій. Флеш-моб акції є породженням Інтернету і мобільного зв'язку і являють собою одну з нових форм соціальної взаємодії в цифрову епоху, для якої властиві типово мережеві ознаки децентралізації, позаінституціональності і деперсоналізації [4].

Зокрема, науковці зазначають, що комунікаційне середовище як феномен інформації є універсальною сукупністю матеріально-речових, субстанціонально-змістовних, технологічних, організаційних умов, що дозволяють соціальним групам і структурам здійснювати передачу та взаємообмін інформацією, що, перш за все, необхідно суб'єктам комунікаційної взаємодії, та спілкування в конкретно-історичному просторово-часовому континуумі [2, 5, 6].

Вирішення питання еволюції комунікаційного середовища як важливої складової розвитку інформаційного суспільства має важливе значення для усвідомлення його як прояву процесів перетворень, що відбуваються в окремій державі та світовому співтоваристві в цілому.

Досліджуючи основні етапи і тенденції розвитку соціально-комунікативних процесів та явищ, які формують комунікаційне середовище, слід зосередитися також на тих важливих питаннях, що в історичному і теоретичному аспектах, з позицій сучасної науки соціальних комунікацій, мають принципове значення для еволюції комунікаційного середовища: а) вплив системи комунікативних дій і процесів на становлення, розвиток і функціонування соціально-комунікаційного середовища; б) соціологічні домінуючі комунікацій, їх рівні, види, ієрархічні періоди та тенденції розвитку з огляду на різні підходи до формування розвинутого комунікаційного середовища; в) головні чинники прогресу кіберцивілізації, що зумовили інтенсифікацію електронних інформаційних потоків і комунікативних процесів в інформаційному суспільстві; г) антологічний, гносеологічний і методологічний підходи при доведенні й обґрунтуванні важливості комунікаційного середовища інформаційного суспільства як цілісного, динамічного, евристичного глобального явища; д) ефективні процеси функціонування всіх соціально-комунікаційних систем і структур, що впливають на умови формування і соціалізацію особистості, можливості її всебічного динамічного розвитку через соціальне просторово-предметне оточення; е) сукупність підходів, засобів, методів доведення значення сучасних технологій комунікації, спілкування, взаємодії та взаємовпливу для подальшого еволюціонування інформаційного суспільства тощо.

Еволюційні тенденції суспільної діяльності створюють умови для збереження і трансляції досягнень культури, науки, освіти тощо, а також задоволення потреб в інформації. Отже, динаміка комунікаційного середовища має основоположне значення для інтенсивного використання доступних знань у всіх значущих сферах діяльності суспільства і є необхідною умовою розвитку соціуму [6, 9]. Водночас важливим кроком до прогресу комунікаційних взаємовідносин має стати активне подолання комунікаційних бар'єрів і перешкод, що можна класифікувати за характером аудиторії, джерелом спілкування та каналами комплексного відображення і передачі інформації (технічних, мовних, психофізіологічних, знакових, смислових, ситуаційних, соціальних, культурних тощо), які виникають у процесі глобальної інформатизації суспільства [5, 8].

Розглядаючи комунікаційне середовище як відображення багатофункціональної системи соціальних зв'язків, взаємовідносин у різних сферах суспільної діяльності, пов'язаних із задоволенням нагальних потреб суспільства, слід пам'ятати, що воно має часові характеристики. Зокрема, минуле – колективний досвід, системи соціально-комунікативного знання, уміння та навички, що втілені в матеріально-суспільних комунікаційних явищах, зразках і традиціях комунікаційної дії та соціально-інформаційних й когнітивних процесах тощо; теперішнє – творча колективна праця, ефективне використання досягнень інформаційної революції в суспільстві, інноваційній трансформації соціально-культурних здобутків людства через результативну прагматичну діяльність, ґрунтовану на використанні комп'ютерних і телекомунікаційних технологій тощо; майбутнє – суспільно необхідні соціально-комунікаційні реальні можливості, перспективні, стратегічні форсайт-проекти, прогресивний розвиток комунікаційного середовища інформаційного суспільства. Отже, здатність суспільства ефективно використовувати інформаційні ресурси і засоби інформаційних комунікацій, досвід і досягнення, застосовувати все це на практиці визначає його інформаційну культуру як результат самоорганізації сучасного соціально-культурного простору. У процесі трансформації інформаційного суспільства рівні інформаційної культури (інформаційна етика, комп'ютерна грамотність, культура мультимедіа тощо) є найважливішими атрибутами розвитку комунікаційних процесів, забезпечують прогрес у взаємодії суб'єктів соціально-комунікативних суспільних відносин.

Історично доведено прямий еволюційний вплив рівнів комунікаційної культури (писемності, книжності, екранної культури, соціально-комунікаційної діяльності, індустріалізації комунікацій як основних компонентів цивілізації) на трансформацію суспільних комунікаційних структур і систем, зокрема й інформаційно-комунікаційних взаємовідносин в інформаційному суспільстві [4, 5].

Крім того, еволюційна спрямованість комунікаційного середовища інформаційного суспільства виявляється через такі його особливості: а) виникнення інноваційних послуг, ґрунтованих на використанні сучасних інформаційних технологій (кіберцивілізація) в суспільних сферах діяльності; б) інтенсивність електронних потоків щодо технологізації та інформатизації комунікаційного середовища; в) формування комунікативно-когнітивних знань, розвиток соціально-комунікаційної інформаційної інфраструктури; г) віртуалізацію соціально-комунікативних відносин як основу прогресу інформатизації суспільства; д) використання інноваційних технологій передачі інформації, креативних ідей, знань як чинників успішного розвитку комунікаційного інформаційного суспільства тощо.

З урахуванням наведеного вище вивчення інформаційно-комунікаційного середовища, предметний аналіз його еволюційного стратегічного становлення та розвитку з позицій науки соціальних комунікацій має практичне значення, насамперед, для розробки та втілення відповідних рекомендацій з метою інноваційного функціонування всіх сфер соціально-комунікаційних взаємовідносин і взаємовпливів за умов глобальної інформатизації суспільства. Усе це потребує певної інформаційної політики, а саме: системно узгоджених концептуальних основ і принципів, які регламентують інформаційні відносини в суспільстві. Слід зауважити, що інформаційна політика визначає закони функціонування інформаційної сфери суспільства. З метою отримання бажаних результатів необхідно реалізувати певні заходи, а саме [7]:

- 1) поширення сучасних електронних мультимедійних засобів надання комунікативних знань та інтеграція їх разом із традиційними класичними формами в міжнародний інформаційний простір;
- 2) організація електронних бібліотек, галузевих архівів та музеїв як сучасних акумуляторів і трансляторів універсальних знань та інформаційних ресурсів;
- 3) втілення перспективних мережевих проєктів – формування єдиної телекомунікаційної, мультисервісної, багатогалузевої сфери та інформаційної магістралі на рівні «місто – країна – міжнародний соціально-комунікаційний простір»;
- 4) створення відповідних сервісних служб, що забезпечують програмно-апаратне та техніко-технологічне управління інформаційно-комунікативними потоками, системами і засобами соціально-комунікаційної взаємодії в середовищі;
- 5) моніторинг інформаційних ресурсів регіону, міста, організація системи відкритого інтерактивного дистанційного інформаційно-комунікативного спілкування в глобальному середовищі.

Зараз стимулом і джерелом комунікаційного розвитку середовища є засоби інформації, які стають головною цінністю інформаційного суспільства. Це пов'язано зі створенням комунікативних систем нового рівня, здатних забезпечити якісну переробку, поширення і обмін інформацією. Як відомо, інформаційна сфера є складовою єдиного інформаційного простору соціуму разом із техносферою і семіосферою [5, 8]. В умовах інфосфери формуються нові соціально-інформаційні організації та інститути, що є невід'ємними елементами соціально-комунікаційного середовища. Саме тому це середовище доцільно розглядати як умовну модель, що гарантує єдність мінімум двох складових: інформаційного простору і інформаційного середовища. Тому виділяються різні підходи до формування розвиненого комунікаційного середовища: по-перше, ресурсного, або технологічного (зберігання і циркуляція інформації для певних суспільних завдань); по-друге, соціокультурного (засіб комунікації та передачі, всі фази інформаційного обміну в суспільстві тощо).

З урахуванням взаємозумовленості цивілізаційного та інформаційного процесів, Д. С. Робертсон (США) запропонував таку формулу: «цивілізація – це інформація». Основуючись на кількісних показниках математичної теорії інформації, він поділяє цивілізації за кількістю та смістю інформації, що постійно виробляється і циркулює в суспільстві [6, 7].

Оскільки інформаційне суспільство – це, по суті, новий ступінь прогресу, то комп'ютеризація, інформаційна революція стають вирішальними чинниками інтелектуалізації, глобалізації та інтернаціоналізації людської діяльності в соціумі [3, 7]. В інформаційно-комунікаційній сфері суспільства нині особливе місце посідає комп'ютерна комунікація (Інтернет-спілкування). Комп'ютери зі звичайного засобу спілкування перетворюються на один із основних способів комунікаційної взаємодії. На думку А. В. Соколова, головною відмінністю комп'ютерної фази комунікації є саме діалог «людина – ЕОМ», який орієнтований на численні одночасні потоки інформації, котра трансформується в знання. За характером, джерелами спілкування та каналами комплексного відображення інформації сучасні комунікативні стратегії базуються на активному символічному використанні інформаційних і телекомунікаційних технологій. Поєднуючи інструментальні і функціональні комунікаційні дії, забезпечують новий тип спілкування людини, культури, соціуму, а саме – віртуальність, інтерактивність, гіпертекстуальність, глобальність, креативність, анонімність, мозаїчність [7]: а) виникнення специфічного паралельного цифрового простору (електронна форма комунікації) зумовленою віртуальністю комунікаційних процесів, коли електронне спілкування, на відміну від усної або документальної форми комунікації, відбувається у віртуальному інформаційному просторі глобальної комп'ютерної мережі; б) інтерактивність виявляється в розвитку гіпермедіа, що разом із мас-медіа є універсальним посередником комунікаційного соціального спілкування в різних сферах суспільного життя; в) гіпертекстуальність розглядається як нова текстуальна парадигма та спосіб комунікації в суспільстві, орієнтовані на численні одночасні потоки інформації. Гіпертекст переходить в Інтернет як пам'ять, загальнодоступний засіб створення, збереження, передачі даних, об'єднує всі інформаційні потоки біт в єдиному інформаційному комунікаційному середовищі, забезпечує глобальний характер спілкування [3, 9]; г) глобалізація комунікації усуває просторово-часові обмеження комунікативної взаємодії, сприяє формуванню мегасуспільства; д) креативність у віртуальному спілкуванні є класичним прикладом виявлення людиною максимальних можливостей для конструктивної діяльності у віртуальному середовищі як новому типу комунікативного співтовариства; е) анонімність проявляється у можливості «сховатися» при спілкуванні в режимі on-line, але, на відміну від преси, радіо і телебачення, в яких інформація транслюється від комунікатора до комуніканта, в Інтернет-спілкуванні відбувається в такий спосіб «комунікаційна взаємодія – комп'юнікація» [4, 7]; ж) мозаїчність у соціокультурному комунікаційному просторі характеризується хаотичністю різноманітних знанневих елементів, надмірністю комунікації в сучасному віртуалізованому інформаційному суспільстві.

Сукупність комунікаційних типів, видів, форм соціального спілкування в інформаційному суспільстві доводять значення єдності взаємовідносин суб'єктів комунікаційних процесів як

найважливішого фактора ефективності результатів практичної діяльності, відповідно до цілей і завдань цивілізаційного розвитку людства.

Висновки. В сучасну епоху сутність людини відчужується вже не в соціальну, а у віртуальну реальність. Надзвичайно широкі інтерактивні можливості кіберпростору сприяють тому, що йде процес переміщення різних видів соціальної діяльності і соціальної взаємодії з реальності існуючої («офф-лайн») у віртуальну – кіберпростір. Поряд з цим в Інтернеті починають все більше проявляти себе нові специфічні форми соціальної взаємодії, соціальні інститути та практики, відсутні раніше в офф-лайн реальності. У більш широкому плані можна говорити про породження кіберпростором нових форм соціальності. Науковці під час наведення в літературних джерелах дефініцій поняття «комунікаційне середовище», розкриваючи філософсько-соціологічну сутність, розглядають його як універсальне, спеціалізоване, глобальне середовище, в якому комунікативний простір трансформується в комунікаційне середовище і набуває змістовного та смислового спрямування комунікації.

Таким чином, особливості еволюції інформаційно-комунікаційного сучасного середовища (глобалізація, розвиток комунікаційних технологій, мережевих мультимедійних цифрових засобів зв'язку) є підтвердженням ефективності комунікації з точки зору історії, теорії, практики інформаційного ноосферогенезу. За таких умов еволюцію комунікаційного середовища слід розглядати як феномен комунікативної взаємодії і гармонійного існування людських спільнот та найважливіший чинник розвитку інформаційного суспільства. Водночас потребують подальшого дослідження концептуальні питання еволюції комунікаційного середовища інформаційного суспільства: вивчення засобів, змісту, форм організації, ефектів, наслідків трансформації соціально-комунікаційних структур в умовах інформаційного суспільства; використання сучасного національного і зарубіжного досвіду формування і практичного застосування інформаційно-когнітивних знань у соціально-комунікаційних процесах; визначення актуальних завдань та стратегій оптимізації комунікаційного середовища інформаційного суспільства тощо.

Література

1. Даніліян В. О. Інформаційне суспільство та перспективи його розвитку в Україні (соціально-філософський аналіз) : монографія / В. О. Даніліян. – Х. : Право, 2008. – 184 с.
2. Іванов Д. В. Віртуалізація суспільства / Іванов Д. В. – СПб., 2000. – С. 15–50.
3. Ильганаева В. А. Социальные коммуникации: (теория, методология, деятельность) : слов.-справ. / В. А. Ильганаева. – Х. : КП «Гор. тип.», 2009. – 392 с.
4. Михайлов В. А. Особенности развития информационно-коммуникативной среды современного общества / В. А. Михайлов, С. В. Михайлов // Актуальные проблемы теории коммуникации : сб. науч. тр. – СПб., 2004. – С. 34–52.
5. Смирнов А. А. Забезпечення інформаційної безпеки в умовах віртуалізації суспільства: досвід Європейського Союзу : монографія / Смирнов А. А. – М. : ЮНИТИ-ДАНА, 2011.
6. Соколов А. В. Общая теория социальной коммуникации / А. В. Соколов. – СПб : Изд-во Михайлова, 2002. – 449 с.
7. Швидка О. Б. Еволюція комунікаційного середовища як чинник розвитку інформаційного суспільства / Швидка О. Б. // Вісник ХДАК. – Х., 2010. – Випуск 29.
8. Champlain J. J. Auditing Information Systems / J. J. Champlain. – 2003. – 430 p.
9. Lan Y. Global Information Society: Operating Information Systems in a Dynamic Global Business Environment / Y. Lan. – 2003. – 430 p.
10. Sauter M. Communication Systems for the Mobile Information Society / M. Sauter. – 2006. – 382 p.

References

1. Danilian V. O. Informatsiine suspilstvo ta perspektivy yoho rozvytku v Ukraini (sotsialno-filosofskyi analiz) : monohrafiia / V. O. Danilian. – Kh. : Pravo, 2008. – 184 s.
2. Ivanov D. V. Virtualizatsiia suspilstva / Ivanov D. V. – SPb., 2000. – S. 15–50.
3. Il'ganaeva V. A. Social'nye kommunikacii: (teoriia, metodologija, dejatel'nost') : slov.-sprav. / V. A. Il'ganaeva. – H. : KP «Gor. tip.», 2009. – 392 s.
4. Mihajlov V. A. Osobennosti razvitija informacionno-kommunikativnoj sredy sovremennogo obshhestva / V. A. Mihajlov, S. V. Mihajlov // Aktual'nye problemmy teorii kommunikacii : sb. nauch. tr. – SPb., 2004. – S. 34–52.
5. Smyrnov A. A. Zabezpechennia informatsiinoi bezpeky v umovakh virtualizatsii suspilstva: dosvid Yevropeiskoho Soiuzu : monohrafiia / Smyrnov A. A. – M. : YuNYTY-DANA, 2011.
6. Sokolov A. V. Obshhaja teoriia social'noj kommunikacii / A. V. Sokolov. – SPb : Izd-vo Mihajlova, 2002. – 449 s.
7. Shvydka O. B. Evoliutsiia komunikatsiinoho seredovyschha yak chynnyk rozvytku informatsiinoho suspilstva / Shvydka O. B. // Visnyk KhDAK. – Kh., 2010. – Vypusk 29.
8. Champlain J. J. Auditing Information Systems / J. J. Champlain. – 2003. – 430 p.
9. Lan Y. Global Information Society: Operating Information Systems in a Dynamic Global Business Environment / Y. Lan. – 2003. – 430 p.
10. Sauter M. Communication Systems for the Mobile Information Society / M. Sauter. – 2006. – 382 p.

Рецензія/Peer review : 16.2.2019 р.

Надрукована/Printed : 10.4.2019 р.

Рецензент: д. т. н., проф. Сорокати́й Р. В.

А. Ю. ШІЛІНГ, П. І. ЖЕЖНИЧ
Національний університет «Львівська Політехніка»

МОДЕЛЬ ПОВЕДІНКИ ЗАКЛАДУ ВИЩОЇ ОСВІТИ У ПРОЦЕСІ ПЛАНУВАННЯ НАДАННЯ ОСВІТНІХ ПОСЛУГ НА ОСНОВІ ЛІНГВІСТИЧНОГО АНАЛІЗУ КОМУНІКАТИВНОЇ АКТИВНОСТІ В ОСВІТНІХ ВЕБ-СПІЛЬНОТАХ

У роботі визначено основну діяльність та тематику комунікативної активності для закладу вищої освіти у певні періоди вступної кампанії на основі лінгвістичного аналізу тематичних дописів користувачів освітніх веб-спільнот. Формалізовано мету кожного періоду вступної кампанії для максимізації цільової функції планування надання освітніх послуг. Встановлено залежність між періодами вступної кампанії та активністю учасників веб-спільнот. Визначено зони росту та зони ризику для спеціальностей закладу вищої освіти за результатами проведеної вступної кампанії.

Ключові слова: заклад вищої освіти, періоди вступної кампанії, активність, комунікативний процес, мотиваційні наміри.

A. YU. SHILINH, P. I. ZHEZHNYCH
Lviv Politechnic National University

MODEL OF BEHAVIOUR OF HIGHER EDUCATION INSTITUTION IN THE PROCESS OF PLANNING TO PROVIDE EDUCATIONAL SERVICES BASED ON LINGUISTIC ANALYSIS OF COMMUNICATIVE ACTIVITY IN EDUCATIONAL WEB-COMMUNITIES

The aim of this article is to construct the model of the activity of a higher educational institution based on a linguistic analysis of the activity of communicative activity in educational web communities. In this article, the approach to the analysis of the communicative activities of the participants of the web communities and the definition of the model of behaviour of the higher educational institution in relation to the activity of the participants of the communication and the periods of the entry campaign are described. The algorithm of behaviour of a higher educational institution regarding the periods of the entry campaign are formulated in the article. The purpose of each period of the entry campaign to maximize the target function of planning the provision of educational services is formalized in the work. This approach is based on the results of the computer-linguistic analysis of the content of educational web communities. As a result of the research, a link between the periods of the entry campaign and the activity of members of the web communities was established. The growth zones and the risk zones for the specialty of higher education institution are determined in the article by the results of the entry campaign.

Key words: higher education institution, periods of entry campaign, activity, communicative process, motivational intentions.

Вступ

Ефективне планування діяльності закладу вищої освіти (ЗВО) у період проведення вступної кампанії (ВК) є запорукою конкурентоспроможності цього ЗВО на ринку освітніх послуг, оскільки це забезпечує ЗВО споживачами цих послуг [1]. Зокрема, моніторинг якості системи вступу до ЗВО є предметом дослідження [2, 3]. Процес вибору ЗВО потенційними абітурієнтами є багаторівневим та складним процесом, оскільки включає не лише інтереси споживача освітніх послуг, престиж спеціальностей та ЗВО, але і психологічні фактори становлення особистості та різні фактори впливу на цю особистість.

Одним із основних факторів впливу на процес прийняття рішення потенційним абітурієнтом є комунікативний процес. З розвитком технологій Веб 2.0, основний процес спілкування перенісся у віртуальний простір [4, 5]. Це значно пришвидшило та облегчило пошук цільової аудиторії (враховуючи учасників з персоніфікованими даними) для інформатизації щодо діяльності ЗВО та для надання загальної інформації про ЗВО у мережі (враховуючи учасників з не персоніфікованими даними та пасивних, відносно комунікативної діяльності)[6]. Особливості сучасної комунікативної лінгвістики розглядаються у дослідженні [7]. Дослідження [8, 9] показує, що одним із найпопулярніших комунікативних середовищ Інтернету є соціальні мережі, які приваблюють користувачів, зокрема молодь, легкістю користування і множиною комунікативних сервісів. На сьогодні із ста найпопулярніших сайтів у світі двадцять – це класичні соціальні мережі [10]. Крім того, популярними є соціальні мережі, які можна охарактеризувати як вузько тематичні.

Саме тому, важливими є інформатизація учасників тематичних груп у соціальних мережах та форумах, та підтримання процесу спілкування у них, оскільки дозволяє встановити та підтримувати зворотній зв'язок з потенційними абітурієнтами для ЗВО. Роль комунікаційної діяльності ЗВО у віртуальних освітніх форумах для абітурієнтів є темою дослідження [11].

Отримання максимально якісного контингенту студентів за результатами вступної кампанії є одним із основних результатів планування надання освітніх послуг [12].

Визначення алгоритму діяльності ЗВО для кожного періоду вступної кампанії [13, 14] дозволить ЗВО прогнозувати контингент студентів, та ефективно планувати надання освітніх послуг. Саме тому, побудова моделі поведінки ЗВО на основі лінгвістичного аналізу комунікативної діяльності в освітніх веб-спільнотах залежно від періодів вступної кампанії є метою даної статті.

Аналіз діяльності ЗВО відносно періодів вступної кампанії

Діяльність ЗВО відносно певного періоду вступної кампанії має на меті максимізувати цільову функцію цього періоду. Кожна така функція, у підсумковому результаті, вплине на кількість якісного контингенту студентів із числа зарахованих.

I період (жовтень-січень) характеризується прийняттям рішення майбутніми абітурієнтами щодо вибору ЗВО та спеціальності.

Цей етап є важливою ланкою планування та прогнозування діяльності закладу вищої освіти, оскільки у цей період ЗВО формулює мету та основні завдання на нову вступну кампанію. Результати аналізу діяльності ЗВО у попередній вступній кампанії є основою для поточного планування.

Метою діяльності ЗВО у I періоді вступної кампанії є максимізація кількості контенту для інформатизації потенційних абітурієнтів щодо пропозиції освітніх послуг закладом вищої освіти.

Отже, цільова функція I періоду вступної кампанії має вигляд:

$$Q_{I\text{TimePeriod}_i} = \frac{HEIContent_i}{EduContent} \rightarrow \max, \quad (1)$$

де $HEIContent_i$ – наявність інформації про освітні послуги ЗВО, $EduContent$ – увесь контент про діяльність ЗВО.

Проведення інформатизації про освітню діяльність ЗВО може здійснити декількома шляхами: подання інформації про освітню діяльність ЗВО на офіційних ресурсах університету, у соціальних мережах, веб-форумах для абітурієнтів, та інших джерелах інформатизації потенційних абітурієнтів (наприклад, публікації на зовнішніх ресурсах). Тобто

$$HEIContent_i = Content_{OfficialResource_i} + Content_{Social Networks_i} + Content_{Forums_i} + Content_{Other_i}, \quad (2)$$

де $Content_{OfficialResource_i}$ – інформація про яльність i -у спеціальність на офіційних ресурсах,

$Content_{Social Networks_i}$ – інформація про i -у спеціальність, надана учасникам тематичних груп у соціальних мережах, $Content_{Forums_i}$ – інформатизація про i -у спеціальність учасників форумів для абітурієнтів,

$Content_{Other_i}$ – інші джерела інформатизації майбутніх абітурієнтів (новини, каталоги тощо).

Особливістю інформатизації потенційних абітурієнтів через офіційні ресурси ЗВО полягає у тому, що ЗВО надає інформацію, яка орієнтується на цільову аудиторію, але **не впливає** на неї. Саме тому, у діяльності ЗВО у вступній кампанії важливо зробити акцент на комунікативній діяльності учасників форумів та соціальних мереж, та їх інформатизація через ці сервіси, оскільки це дає змогу безпосередньо впливати на процес прийняття рішення учасників цільової аудиторії, виокремлюючи з дописів мотиваційні наміри учасників.

Для максимізації цільової функції необхідно здійснювати вплив на:

- вибір ЗВО потенційним абітурієнтом;
- вибір пріоритету спеціальностей.

Як відомо [11], одним із швидких та ефективних можливостей впливу є комунікативна діяльність на спеціалізованих Веб-форумах та тематичних групах у соціальних мережах.

Якщо розпочинається освітня дискусія у веб-спільноті, то це означає, потенційний абітурієнт не володіє необхідною інформацією або ж наявна інформація викликає низку запитань та уточнень. У такому разі, необхідно, спершу виявити мотиваційні наміри потенційних абітурієнтів у цій комунікативній діяльності, які відповідають цьому періоду вступної кампанії. А також швидко реагувати на початок та тематику комунікативної діяльності, і надавати необхідну інформацію.

Якщо ж комунікативна діяльність не розпочалася, то ЗВО необхідно її розпочати, надавши інформацію про спеціалізований форум в інших веб-спільнотах, щоб виключити ситуацію, коли потенційні абітурієнти просто не володіють інформацією про наявність такого форуму. А також включатися у комунікативну діяльність у соціальних мережах, обираючи для надання інформації користувачів вікової категорії потенційних абітурієнтів та молодших за них на рік.

ЗВО повинен проінформувати про усі переваги та можливості отримання додаткових балів для підвищення особистого рейтингу потенційного абітурієнта при вступі. А саме:

- наявність підготовчих курсів для абітурієнтів та отримання додаткових балів до рейтингу;
- участь в олімпіадах при ЗВО для школярів та їх кількість додаткових балів;
- кількість місць державного замовлення на популярні спеціальності ЗВО та альтернативні варіанти спеціальностей цього ЗВО (суміжні спеціальності) для отримання відповідної кваліфікації;
- переваги навчання в обраному ЗВО;
- відгуки та репортажі студентів щодо навчання у ЗВО;
- інформація про активне студентське дозвілля у ЗВО;
- інформація про можливості подальшого удосконалення професійних знань, умінь та навичок;
- інформація про працевлаштування.

Отже, діяльність ЗВО у I періоді ВК є ґрунтовною і включає не тільки процеси аналізу та прогнозування, але і комунікативну діяльність із потенційними споживачами освітніх послуг та виявлення у ній лінгвістичних аспектів їх мотиваційних намірів.

II період (лютий – квітень) характеризується ресстрацією на зовнішнє незалежне оцінювання

Метою діяльності ЗВО у II періоді вступної кампанії є максимізація цільової аудиторії. Надавши достатньо необхідної інформації щодо надання освітніх послуг, ЗВО повинен зробити так, щоб необхідна

інформація надійшла до адресата.

Отже, цільова функція II періоду має вигляд:

$$Q_{II\text{Time Period}_i} = \frac{QAudience_i}{QEntrance} \rightarrow \max \quad (3)$$

де $QAudience_i$ – кількість зацікавлених, щодо i -ї спеціальності ЗВО, потенційних абітурієнтів, $QEntrance$ – загальна кількість потенційних абітурієнтів на поточну вступну кампанію.

Але, потрібно враховувати те, що потенційні абітурієнти, які визначилися зі спеціальністю на користь цього ЗВО не потребують значної уваги, оскільки вони і так уже є абітурієнтами ЗВО. Тому, основну увагу необхідно звернути на тих абітурієнтів, які ще не визначилися з майбутньою спеціальністю, або ж їхнє коло інтересів не повністю співпадає з інтересами спеціальностей цього ЗВО.

У II періоді ВК потенційні абітурієнти активно реєструються на ЗНО. Більшість із них уже визначилися із спеціальністю, але є можливість впливу на вибір ЗВО.

Для початку необхідно проаналізувати комунікативну діяльність на спеціалізованих веб-форумах для абітурієнтів та у соціальних мережах, та виявити мотиваційні наміри потенційних абітурієнтів. Їх аналіз дозволить скласти певне уявлення про попит потенційних споживачів освітніх послуг щодо отримання бажаної спеціальності та бажання навчатися у вказаному ЗВО. Вплив на процес прийняття рішення майбутніх студентів можуть здійснити:

- кількість місць державного замовлення;
- престиж ЗВО.

Кількість місць державного замовлення можуть вплинути на тих абітурієнтів, які мають бажання або потребу отримати це місце. Саме тому, таким користувачам необхідно надати цю інформацію та ознайомити із можливістю навчатися на суміжній спеціальності, яка має більшу кількість бюджетних місць, або ж не є такою популярною як вказана. До цієї інформації потрібно також вказати переваги та перспективи навчання на суміжній спеціальності.

Якщо ж виявлені мотиваційні наміри показують, що потенційний абітурієнт бажає навчатися в конкретному ЗВО, то вплинути на процес прийняття рішення може інформація про активне наукове життя студентів ЗВО та їх дозвілля, а також інформація про участь цього ЗВО у різних міжнародних програмах та тендерах, отримання грантів тощо.

Отже, діяльність ЗВО у II періоді ВК є ціленаправленою на збільшення цільової аудиторії шляхом впливу на розширення кола інтересів потенційних абітурієнтів та окреслення кола спеціальностей відносно виявлених у них мотиваційних намірів.

III період (травень – червень) характеризується складанням зовнішнього незалежного оцінювання випускниками шкіл.

У цей період потенційні абітурієнти уже окреслили коло спеціальностей і складають предмети ЗНО.

Метою діяльності ЗВО у III періоді ВК є збільшення контенту щодо правил вступу на спеціальності ЗВО, а саме інформація про предмети на вибір та можливість навчатися на інших, суміжних, спеціальностях з вибраними предметами.

Цільовою функцією цього періоду є функція:

$$Q_{III\text{Time Period}_i} = \frac{ChooseSubjectInform_i + AdjacentSpecInform_i}{HEIContent} \rightarrow \max \quad (4)$$

де $ChooseSubjectInform_i$ – перелік вибіркових предметів i -ї спеціальності, $AdjacentSpecInform_i$ – перелік суміжних спеціальностей, відносно i -ї спеціальності, $HEIContent$ – уся освітня інформація цього ЗВО.

Комунікативна діяльність є пов'язаною з уточненням переліку предметів ЗНО для певних спеціальностей, або ж порядком подання електронних заяв на вступ та переліком пільгових категорій для вступу. Саме тому, представникам ЗВО необхідно надати цю інформацію або ж повідомити про зміни, якщо такі відбулися. Варто також довести до відома інформацію про прохідний рейтинговий бал за результатами попередньої вступної кампанії на популярні спеціальності, або ж спеціальності, згадані у дописах потенційних абітурієнтів у веб-спільнотах.

У цей період необхідно приділити увагу вибору пріоритету майбутнім студентом.

На вибір пріоритету впливають:

- престиж ЗВО;
- престиж спеціальності;
- кількість місць державного замовлення.

Важливо, щоб інформація була конкретною і дозованою залежно від мотиваційних намірів користувачів.

Отже, розширення можливостей щодо вступу для потенційних абітурієнтів є визначальним аспектом діяльності ЗВО у III періоді ВК.

IV період (липень – серпень) характеризується поданням документів та відповідних сертифікатів до ЗВО та зарахуванням абітурієнтів на навчання.

Діяльність споживачів освітніх послуг у IV період є найактивнішою з усіх періодів вступної

кампанії. Отже, і діяльність ЗВО у цьому періоді повинна відповідати критеріям швидкості та достовірності. Саме тому, **метою діяльності ЗВО у IV періоді ВК є швидкість реакцій на запити та якість інформації відносно цих запитів.**

Цільовою функцією цього періоду є функція:

$$Q_{IVTimePeriod_i} = \frac{NReactions_i(t)}{NPosts_i(t)} \rightarrow 1 \quad (5)$$

де $NReactions_i(t)$ – кількість своєчасних реакцій на дописи користувачів у веб-середовищі відносно i -ї спеціальності, $NPosts_i(t)$ – кількість дописів щодо i -ї спеціальності. t – часовий період актуальності інформації.

Комунікативна діяльність цього періоду є найбільш активною, оскільки абітурієнти потребують інформації щодо переліку документів для вступу та формування рейтингових списків. У цей період важливо швидко реагувати та надавати необхідну інформацію для майбутніх студентів. Інформація, яку отримують споживачі освітніх послуг повинна бути якісною та достовірною, і найголовніше – вчасною, відносно періоду вступної кампанії та хвилей зарахування до ЗВО, оскільки вона може бути вирішальною у процесі прийняття рішення потенційним абітурієнтом щодо вибору спеціальності та ЗВО.

Отже, основна діяльність ЗВО у IV періоді націлена на формування контингенту майбутніх студентів.

V період (вересень) характеризується узгодженням запитань щодо навчальної діяльності університету та соціально-побутових умов.

Цей період є завершальним для поточної вступної кампанії та важливим для прийняття рішення ЗВО для подальшого планування надання освітніх послуг у наступній ВК.

Активність комунікативної діяльності у цьому періоді на освітніх веб-форумах зменшується. Тематика повідомлень стосується налагодження соціально-побутових умов та дозвілля студентів.

Для ефективного планування надання освітніх послуг ЗВО необхідно:

- обчислити кількість якісного контингенту студентів із числа зарахованих ($Q_{contingent}$);
- визначити зони ризиків та зони росту для спеціальностей залежно від значення $Q_{contingent}$ [15];
- зробити порівняльний аналіз показників вибору пріоритетів з середнім його показником;
- співставити мотиваційні наміри абітурієнтів із вибором пріоритету спеціальностей;
- адаптувати описи освітніх програм на сайті університету для сприйняття їх потенційними абітурієнтами, враховуючи мотиваційні наміри останніх;
- вивести рейтинг спеціальностей за поданими заявами та отриманими оригіналами;
- сформувати звіт за попередню та план дій на наступну вступну кампанію.

Отже, V період ВК є завершальним для поточної вступної кампанії. Результати проведеної ВК є показниками якості планування надання освітніх послуг цим ЗВО.

Висновки

Отже, алгоритм діяльності ЗВО відносно кожного періоду вступної кампанії включає чіткі кроки поведінки цього ЗВО, які ґрунтуються на аналізі попередньої ВК та аналізу діяльності ЗВО на попередньому її етапі та лінгвістичному аналізі комунікативної діяльності потенційних абітурієнтів відносно кожного періоду вступної кампанії. Оскільки інформатизація потенційних абітурієнтів через офіційні ресурси ЗВО безпосередньо не впливає на них, тому основний вплив на майбутніх споживачів освітніх послуг варто спрямувати через комунікативну діяльність. Дії ЗВО повинні узгоджуватися із мотиваційними намірами потенційних абітурієнтів на кожному етапі та вирізнятися швидкістю реакції та достовірністю інформації, яку надає ЗВО. Варто також враховувати, що інформація повинна не засмічувати інформаційний простір, а бути дозованою та цікавою і легкою для сприйняття користувачем.

Література

1. Сидоренко О. Л. Удосконалення процесу вступу до вищих навчальних закладів як пріоритетний напрям освітньої політики в Україні / О. Л. Сидоренко // *Методологія, теорія та практика соціологічного аналізу сучасного суспільства* : збірник наукових праць. – Х. : ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2010. – Випуск 16. – С. 649–653.
2. Моніторинг якості системи вступу до ВНЗ як необхідна умова її вдосконалення // *Вісник ТІМО*. – 2010. – № 2-4. – С. 2–4.
3. *Управління якістю системи освіти у вищих навчальних закладах*. Ч. 1: Теоретичні засади формування систем управління якістю надання освітніх послуг : навчальний посібник / за дер. В. С. Загорського. – Львів, 2011. – 136 с.
4. Ярکا У. Веб-сайт як засіб комунікативної діяльності суспільства / У. Ярکا, О. Бойчук, Л. Ляхович // *INFORMATION, COMMUNICATION, SOCIETY (ICS-2016)*, 19–21 MAY 2016. – LVIV, 2016. – С. 90–91.
5. Korzh R. University's Information Image as a Result of University Web Communities' Activities / R. Korzh, A. Peleshchysyn, Y. Syerov, S. Fedushko // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. – 2017. – 512. – P. 115–127.

6. Серов С. О. Система верифікації персональних даних веб-учасників / С. О. Серов, С. С. Федущко, Р. О. Голощук // Вісник Хмельницького національного університету: Технічні науки. – 2017. – 5(253). – С. 104–108.
7. Собецька Н. В. Сучасний лінгвогендерологічний простір з погляду комунікативної лінгвістики [Електронний ресурс] / Н. В. Собецька // Мова і культура : наук. журнал. – К. : Видавничий дім Дмитра Бураго, 2013. – Вип. 16, т. I (163). – С. 165–171.
8. Ahmadi K. Personality characteristics do Teenagers with internet addiction / K. Ahmadi, M. R. Abdi, H. Abdolmaleki & A. M. Shahsavarani // Scientific Monthly Journal of Kermanshah University of Medical Sceinces. –2011. – 16(6). – P. 487–492.
9. Huminskyi R. V. Suggestions for Informational Influence on a Virtual Community / R. V. Huminskyi, A. M. Peleshchyshyn and Z. Holub // International Journal of Computer Science and Business Informatics. – 2015. – № 15, (1). – P. 47–65.
10. Семенов Н. Все о социальных сетях. Влияние на человека. Проблема социальных сетей [Електронний ресурс] / Н. Семенов. – Режим доступу : <http://www.seonews.ru/columns/vse-o-sotsialnyih-setyah-ivliyanie-na-cheloveka-problema-sotsialnyih-setey>.
11. Жежнич П. І. Комунікаційна діяльність ВНЗ у віртуальних освітніх форумах для абітурієнтів / П. І. Жежнич, А. Ю. Шілінг // Інформація, комунікація, суспільство 2014 : матеріали 3-ї Міжнародної наукової конференції ІКС-2014, 21–24 травня 2014 року, Україна, Львів, Славське. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2014. – С. 58–59.
12. Жежнич П. І. Оптимізація планування надання освітніх послуг у закладах вищої освіти на основі лінгвістичного аналізу / П. І. Жежнич, А. Ю. Шілінг // Науковий вісник НЛТУ України Львів. – 2018. – Том 28. – № 10. – С. 129–134.
13. Шілінг А. Ю. Особливість формування інформаційного наповнення освітніх спільнот. Тривалість життя інформації / А. Ю. Шілінг, П. І. Жежнич // Наукові підсумки 2018 року : матеріали XXV Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції. – Вінниця, 2018. – Частина 4. – С. 76–77.
14. Трач О. Р. Критичність показників завдань напрямів організації життєвого циклу віртуальної спільноти / О. Р. Трач // Вісник Хмельницького національного університету: Технічні науки. – 2017. – 5(253). – С. 177–182.
15. Шілінг А. Ю. Критерії ефективності планування надання освітніх послуг закладам вищої освіти на основі лінгвістичного аналізу / А. Ю. Шілінг, П. І. Жежнич // V Міжнародна науково-практична інтернет-конференція «Сучасний рух науки». – Дніпро, 2019.

References

1. Sydorenko O. L. Udoshkonalennia protsesu vstupu do vyshchykh navchalnykh zakladiv yak priorytetnyi napriam osvითnoi polityky v Ukraini / O. L. Sydorenko // Metodolohiia, teoriia ta praktyka sotsiolohichnoho analizu suchasnoho suspilstva : zbirnyk naukovykh prats. – Kh. : KhNU imeni V. N. Karazina, 2010. – Vypusk 16. – С. 649–653.
2. Monitorynh yakosti systemy vstupu do VNZ yak neobkhidna umova yui vdoshkonalennia // Visnyk TIMO. – 2010. – № 2-4. – С. 2–4.
3. Upravlinnia yakistiu systemy osvითy u vyshchykh navchalnykh zakladakh. Ch. 1: Teoretychni zasady formuvannia system upravlinnia yakistiu nadannia osvითnikh posluh : navchalnyi posibnyk / za der. V. S. Zahorsko. – Lviv, 2011. – 136 s.
4. Iarka U. Veb-sait yak zasib komunikatyvnoi diialnosti suspilstva / U. Yarka, O. Boichuk, L. Liakhovych // INFORMATION, COMMUNICATION, SOCIETY (ICS-2016), 19–21 MAY 2016. – LVIV, 2016. – С. 90–91.
5. Korzh R. Universitys Information Image as a Result of University Web Communities Activities / R. Korzh, A. Peleshchyshyn, Y. Syerov, S. Fedushko // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2017. – 512. – R. 115–127.
6. Sierov S. O. Systema veryfikatsii personalnykh danykh veb-uchasnykiv / S. O. Sierov, S. S. Fedushko, R. O. Holoshchuk // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2017. – 5(253). – С. 104–108.
7. Sobetska N. V. Suchasnyi lnhvohenderolohichnyi prostir z pohliadu komunikatyvnoi lnhvistyky [Elektronnyi resurs] / N. V. Sobetska // Mova i kultura : nauk. zhurnal. – K. : Vydavnychiy dim Dmytra Buraha, 2013. – Vyp. 16, t. I (163). – С. 165–171.
8. Ahmadi K. Personality characteristics do Teenagers with internet addiction / K. Ahmadi, M. R. Abdi, H. Abdolmaleki & A. M. Shahsavarani // Scientific Monthly Journal of Kermanshah University of Medical Sceinces. –2011. – 16(6). – P. 487–492.
9. Huminskyi R. V. Suggestions for Informational Influence on a Virtual Community / R. V. Huminskyi, A. M. Peleshchyshyn and Z. Holub // International Journal of Computer Science and Business Informatics. – 2015. – № 15, (1). – R. 47–65.
10. Semenov N. Vse o social'nyh setjah. Vlijanie na cheloveka. Problema social'nyh setej [Elektronnij resurs] / N. Semenov. – Rezhim dostupu : <http://www.seonews.ru/columns/vse-o-sotsialnyih-setyah-ivliyanie-na-cheloveka-problema-sotsialnyih-setey>.
11. Zhezhnych P. I. Komunikatsiina diialnist VNZ u virtualnykh osvითnikh forumakh dlia abiturientiv / P. I. Zhezhnych, A. Yu. Shilinh // Informatsiia, komunikatsiia, suspilstvo 2014 : materialy 3-yi Mizhnarodnoi naukovoї konferentsii IKS-2014, 21–24 travnia 2014 roku, Ukraina, Lviv, Slavske. – Lviv : Vydavnytstvo Lvivskoi politekhniki, 2014. – С. 58–59.
12. Zhezhnych P. I. Optymizatsiia planuvannia nadannia osvითnikh posluh u zakladakh vyshchoї osvითy na osnovi lnhvistychnoho analizu / P. I. Zhezhnych, A. Yu. Shilinh // Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy Lviv. – 2018. – Том 28. – № 10. – С. 129–134.
13. Shilinh A. Yu. Osoblyvist formuvannia informatsiinoho napovnennia osvითnikh spilnot. Tryvalist zhyttia informatsii / A. Yu. Shilinh, P. I. Zhezhnych // Naukovi pidsumky 2018 roku : materialy XXV Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi internet-konferentsii. – Vinnytsia, 2018. – Chastyna 4. – С. 76–77.
14. Trach O. R. Krytychnist pokaznykiv zavdan napriamiv orhanizatsii zhyttievoho tsykladu virtualnoi spilnoty / O. R. Trach // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2017. – 5(253). – С. 177–182.
15. Shilinh A. Yu. Kryterii efektyvnosti planuvannia nadannia osvითnikh posluh zakladam vyshchoї osvითy na osnovi lnhvistychnoho analizu / A. Yu. Shilinh, P. I. Zhezhnych // V Mizhnarodna naukovo-praktychna internet-konferentsiia «Suchasnyi rukh nauky». – Dnipro, 2019.

Рецензія/Peer review : 24.3.2019 р.

Надрукована/Printed : 10.4.2019 р.

Рецензент: д. т. н., проф. Пелешшин А. М.

І. В. ГУЛА, Л. В. КАРПОВА, В. М. МЕЛЬНИЧУК, О. І. ПОЛІКАРОВСЬКИХ
Хмельницький національний університет

МЕТОД ЗМЕНШЕННЯ ПЕРІОДИЧНОЇ СКЛАДОВОЇ ШУМІВ ЦИФРОВИХ СИНТЕЗАТОРІВ ПРЯМОГО СИНТЕЗУ

Розглянуто джерела виникнення шумів та бічних складових у спектрах прямих цифрових синтезаторів частоти – DDS. Виконано математичний аналіз виникнення шумів у синтезаторах цього типу. Розглянуто метод для зменшення періодичної складової у вихідному спектрі прямого цифрового синтезу. Застосування запропонованого методу зменшення періодичної складової дозволить зменшити рівні бічних складових у синтезаторах DDS типу. Розглянуто методи підвищення якості спектральних характеристик синтезованих сигналів обчислювальних синтезаторів частоти. Запропоновані структури синтезаторів із покращеними спектральними характеристиками. Застосування запропонованих структур синтезаторів дозволить зменшити рівні позасмугових випромінювань апаратури радіозв'язку, що використовує цифрові обчислювальні синтезатори.

Ключові слова: Software Defined Radio (SDR), АЦП, ЦАП, прямий синтезатор частоти.

I. V. HULA, L. V. KARPOVA, V. M. MELNYCHUK, O. I. POLIKAROVSKYKH
Khmelnitskyi National University

METHOD OF REDUCING PERIODIC COMPONENT NOISES DIGITAL SYNTHESIZERS DIRECT SYNTHESIS

Considered sources of noise and lateral components in the spectra of direct digital frequency synthesizers - DDS. A mathematical analysis of noise in this type of synthesizers. The method for reducing the periodic component in the output spectrum of direct digital synthesis. Application of the proposed method reduce the periodic component will reduce the level of lateral components in DDS synthesizers type. Methods of improving the quality of the spectral characteristics of the synthesized signal DDS. The proposed structure DDS with improved spectral characteristics. Application of the proposed structures synthesizers will reduce the level of spurs outside the band radio equipment that uses DDS. *The methods and means of reducing the lateral spectral components in the output spectrum of the classical computational synthesizer based on accumulative adder. We found that it is possible to build a synthesizer with high tactical and technical characteristics of the algorithm used by Wheatley. The possibilities of the application of new mathematical approaches for building adders without a problem propagation delay signal transfer from the category in the category codeword. Consider a Boolean algebra operations over a couple of numbers and the theory of Galois fields to improve performance synthesizer. The mathematical apparatus will build a digital computer synthesizer with lower levels of lateral components in the spectrum of the output signal, due to some complications of the internal structure of the synthesizer using two additional adders and pseudo-random number generator.*

Keywords: Software Defined Radio (SDR), ADC, DAC, direct frequency synthesizer (DDS).

Постановка задачі

На сьогодні активно ведуться розробки технології, що отримала загальну назву Software Defined Radio (SDR) [1]. Вихідним елементом радіопередавача у такій технології є, як правило, цифровий синтезатор частоти з можливістю модуляції усіх базових параметрів сигналу (фази, частоти, амплітуди). Параметри такого синтезатора визначають якість роботи систем побудованих за технологією SDR. У процесі роботи DDS синтезатора виникає цілий ряд джерел похибок і шумів синтезатора, що призводить до погіршення тактико-технічних характеристик такої апаратури. Завданням роботи є виявлення оптимальної побудови внутрішньої структури синтезатора з метою мінімізації шумів систем SDR.

Обчислювальним синтезаторам притаманна операція квантування відліків фази та амплітуди синтезованих сигналів, що призводить до появи у вихідному спектрі бічних складових квазівипадкового характеру. Їх суму у деякому діапазоні частот зазвичай називають шумом квантування. Відповідно говорять про рівень шумових бічних складових або про рівень шуму квантування [2]. Теоретично, за рівності розрядності накопичувального суматора, модуля пам'яті і ЦАП, відношення сигнал/шум на виході ЦОС (Цифрового Обчислювального Синтезатора) може складати більше 190 дБ. Проте, на жаль, технологія виготовлення ВІС (великих інтегральних схем) не дозволяє досягнути такого значення розрядності перетворювача фаза-амплітуда і ЦАП. Як правило, у реальних синтезаторах використовується накопичувальний суматор із розрядністю 32 біта, розрядністю пам'яті 12–16 біт, розрядність шини даних 8–16 одиниць. Це приводить до виникнення помилок у вигляді амплітудного і фазового шуму, що потребує пошуку нові технічні рішення для побудови пристроїв компенсації різного роду помилок.

Аналіз досліджень та публікацій

Проаналізуємо основні джерела шумів, що виникають у DDS. Як правило, у DDS синтезаторі виділяють шість джерел шумів, що символічно зображені на рис. 1.

Цими джерелами є: e_p – операція відсікання адресу перед перетворювачем фаза-амплітуда (постійна пам'ять із записок відліків функції синус), e_{comp} – спотворення від стиснення синусоїдальної функції у постійній пам'яті, e_A – точність збереження амплітуди функції синуса, що зберігається у постійному запам'ятовуючому пристрої, n_{clk} – фазовий шум тактової частоти, Δf – похибка частоти.

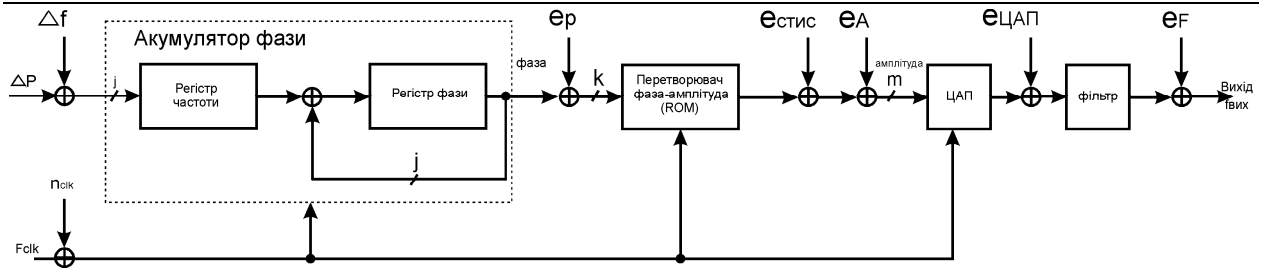


Рис. 1. Структурна схема DDS із джерелами виникнення шумів

Основним джерелом похибок синтезу є ефект виникнення спотворення синтезованого сигналу в процесі відкидання молодших розрядів регістру фази, тобто перетворення j -розрядного слова у k -розрядне. Розглянемо більш детально цей процес.

В ідеальному випадку без цієї процедури відсікання молодших біт – вихідна послідовність відліків синтезованого сигналу може бути представлена:

$$s(n) = \sin\left(2\pi \frac{\Delta P}{2^j} n\right). \quad (1)$$

Через те, що об'єм пам'яті, що використовується у синтезаторах, обмежений здійснюється процедура усічення кодового слова з j до k -біт, що приводить до перетворення виразу 1 у 2 (квадратні дужки [] тут означають процедуру усічення значення фазового акумулятора до цілого числа):

$$s(n) = \sin\left(\frac{2\pi}{2^k} \left[\frac{\Delta P}{2^{j-k}} n \right]\right). \quad (2)$$

Цей вираз може бути представлено:

$$s(n) = \sin\left(\frac{2\pi}{2^j} (\Delta P n - e_p(n))\right), \quad (3)$$

де $e_p(n)$ – помилка відсікання фази. Фазові помилки послідовності відліків обмежені за своїм максимальним значенням

$$e_p(n) < 2^{j-k},$$

та мають той самий період. Помилки відсікання фази виникають лише тоді, коли $GCD(\Delta P, 2^j)$ менший ніж 2^{j-k} . Якщо ж $GCD(\Delta P, 2^j)$ рівний або більший за 2^{j-k} , тоді молодші біти фази дорівнюють нулеві і фазових помилок не виникає.

Процес відсікання фази має так саме періодичну природу, що призводить до виникнення спотворень кратних основній тактовій частоті. Розглянемо їх природу докладніше. Приріст фази може бути визначений

$$\Delta P = W + L/M,$$

де L та M не мають спільного дільника. W – ціла частина значення прирости фази, дробова частина – L/M . Тільки ціла частина здатна адресувати постійний запам'ятовуючий пристрій. Якщо L та M прості числа, то M – найменше ціле, що робить приріст фази цілим числом: $M\Delta P = M(W + L/M)$. Отже вихідна послідовність даних, що виходить з постійної пам'яті має спільний період MT_{clk} , де M дорівнює:

$$M = \frac{2^{j-k}}{GCD(\Delta P, 2^j)}. \quad (4)$$

Тут $GCD(\Delta P, 2^j)$ – найбільший спільний дільник фазового приросту ΔP та 2^{j-k} . А кількість додаткових складових у спектрі може бути обчислено наступним чином:

$$Y = \frac{2^{j-k}}{GCD(\Delta P, 2^{j-k})} - 1 = M - 1. \quad (5)$$

Спробуємо проаналізувати спектр вихідного сигналу синтезатора прямого синтезу за умови застосування відсікання фази. Один відлік синусоїдального сигналу $e^{j\omega_0 t}$ у нашому випадку може бути представлено

$$G(\omega) = \frac{1}{T_{clk}} \sum_{r=-\infty}^{\infty} A(r) 2\pi \delta[\omega - \omega_0 - r(2\pi/MT_{clk})], \quad (6)$$

де коефіцієнт $A(r)$ обчислюється як:

$$A(r) = \sum_{m=0}^{M-1} \left[\frac{1}{M} e^{-j2\pi m f_0 / f_{clk}} \right] e^{-jrm(2\pi/M)}, \quad (7)$$

та $f_{clk} = 1/T_{clk}$, а $f_0 = \omega_0/2\pi$, $\{t_m T_{clk}, m = 0, 1, 2, \dots, M-1\}$.

Аналіз виразів 6 та 7 в результаті дає можливість визначити амплітуди кожної з додаткових складових, що виникають у спектрі синусоїдального сигналу [2]. З виразу 7 отримуємо дискретне перетворення Фур'є сигналу DDS синтезатора

$$A(r, L, M, N) = \sum_{m=0}^{M-1} \left[\frac{1}{M} e^{-j2\pi(mL)_M/MN} \right] e^{-jrm(2\pi/M)}. \quad (8)$$

Застосування теореми Парсеваля до виразу 8 дає змогу обчислити значення амплітуди кожної із додаткових складових, що виникають у процесі відсікання молодших біт фазового слова. Співвідношення сигнал/шум синтезатора може бути обчислено наступним чином:

$$\frac{S}{N} = 10 \log_{10} \left[\frac{|A(0, L, M, N)|^2}{1 - |A(0, L, M, N)|^2} \right], \quad (9)$$

де $|A(0, L, M, N)|^2$ може бути визначено з (8):

$$|A(0, L, M, N)|^2 = \left[\frac{\sin^2(\pi/N)}{(\pi/N)^2} \frac{(\pi/MN)^2}{\sin^2(\pi/MN)} \right]. \quad (10)$$

Аналіз виразів 9 та 10 показує, що у спектрі сигналу DDS синтезатора існують спектральні бічні спектральні складові, див. рис. 2.

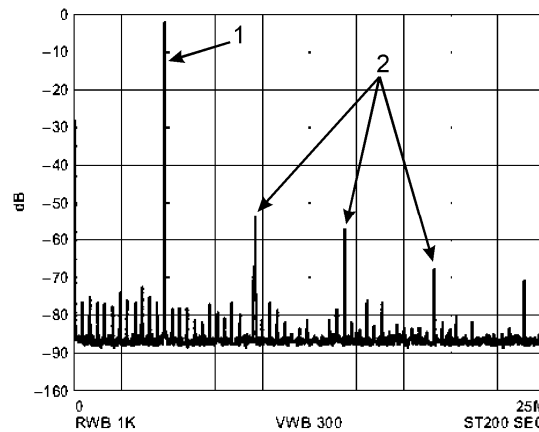


Рис. 2. Типовий вигляд спектру DDS синтезатора частоти: 1 – основна синтезована частота, 2 – бічні складові, що виникають внаслідок відсікання молодших розрядів фазового слова [3]

Розподіл цих складових, та їх амплітуди можуть бути обчислені за формулами 9 та 10. Ці складові виникають внаслідок обмеження пам'яті синтезатора. Процес відсікання фази носить періодичний характер і таким чином призводить до виникнення спотворень.

Окремо фазові та амплітудні шуми у DDS можуть бути обчислені з наступних співвідношень. Фазовий шум, що виникає у процесі квантування фази, визначається за формулою:

$$D_\phi = 20 \lg \left[\frac{\pi}{2^{q+1} \sqrt{12}} \right], \quad (11)$$

де q – число відліків квантування фази на чверть періоду гармонійного сигналу. Квантування за рівнями в перетворювачі фаза-амплітуда створює амплітудний шум

$$D_a = 20 \lg \left[\frac{1}{\sqrt{6(2^n - 1)}} \right], \quad (12)$$

де n – кількість вихідних розрядів відліків перетворювача фаза-амплітуда на чверть періоду синусоїдального сигналу або розрядність ЦАП без врахування розрядів керування сегментами.

В [4] показано, що в більшості сучасних ЦОС використовується достатньо висока на даному етапі розвитку мікроелектроніки розрядність ЦАП, яка складає 10–16 розрядів. Це забезпечує рівень вищих гармонік у вихідному сигналі не більше 20...15 дБ. При цьому також знижується рівень дискретних компонентів спектру поблизу носійної, що проявляється у випадку нецілого числа. Розглянемо деякі способи корекції такого роду складових:

- 1) спеціальний вибір кроку дискретизації за рівнями;
- 2) індивідуальна калібровка і вирівнювання рівнів спрацювання ключів у ЦАП і якості перехідних процесів;
- 3) використання двох чи трьох ступенів вибірок із вихідного сигналу ЦАП, що виключають вплив початкового процесу після перемикавання;

4) використання подільників частоти з коефіцієнтом $N/(N+1)$ у складі схеми формування опорного колювання, що покращує співвідношення між вихідною і тактовими частотами для деяких несприятливих співвідношень вказаних частот;

5) формування на вході молодшого розряду ЦАП псевдовипадкової послідовності для розширення спектру паразитних спектральних складових (ПСС);

6) збільшення періоду повторення помилок усереднення використанням більш довгої псевдовипадкової послідовності;

7) стохастизація (рандомізація) вихідних сигналів ЦОС.

Перші чотири способи знижують величину похибки дискретизації, а останні три призводять до того, що спектральна густина потужності зосереджених за частотою паразитних спектральних складових розподіляється більш рівномірно, наближається до рівня шумових складових.

Найвідомішим методом для зменшення рівнів бічних складових є описаний у літературі модифікований накопичувач фази Ніколаса [2].

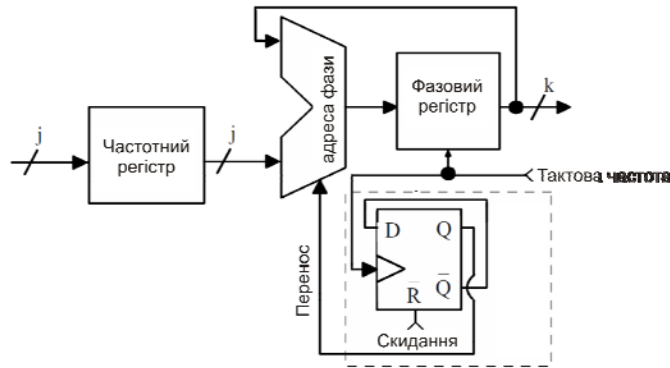


Рис. 3. Модифікований накопичувач фази Ніколаса

Алгоритм функціонування цифрового обчислювального синтезатора дозволяє розробити доволі простий спосіб зменшення рівнів бічних складових у найгіршому випадку на 4 дБ. В структуру класичного фазового акумулятора вводиться додатковий елемент у відповідності до рис. 3. Така структура не порушує періодичність помилки послідовностей, однак розподіляє потужність бічних складових у пікових викидах за шириною спектра.

Якщо найбільший спільний дільник $НСД(\Delta P, 2^{j-k})$, де ΔP – значення у частотному реєстрі, рівний 2^{j-k-1} , то потужність бічних викидів сконцентрується у одному пікові (рис. 2). Найгірший випадок відношення потужності носійної до потужності бічної складової визначається так [2]

$$\frac{C}{S} = (6,02k - 3,992)дБн, \tag{13}$$

де k – розрядність слова вихідного сигналу фазового накопичувача, що використовується як адреса в перетворювачі фаза-амплітуда. При моделюванні з параметрами розрядність накопичувача $j=12$, $k=8$, розрядність даних на виході ПЗП $m=10$, $\Delta P=264$, відношення носійної до бічних складових складо 44,24 дБ (рис. 4).

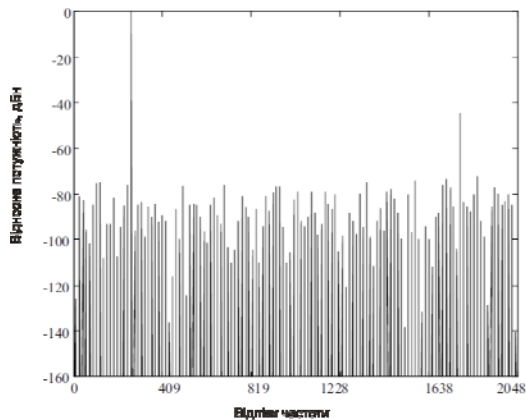


Рис. 4. Розподіл бічних складових, що виникають у процесі відсікання бітів фази класичного синтезатора. При моделюванні з параметрами розрядність накопичувача $j=12$, $k=8$, розрядність даних на виході ПЗП $m=10$, $\Delta P=264$

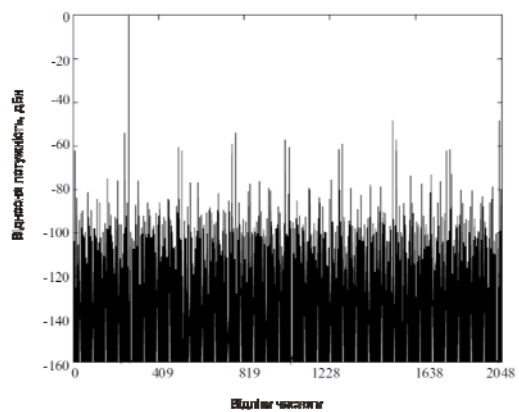


Рис. 5. Розподіл бічних складових, що виникають у процесі відсікання бітів фази класичного синтезатора. При моделюванні з параметрами розрядність накопичувача $j=12$, $k=8$, розрядність даних на виході ПЗП $m=10$, $\Delta P=265$

При $НСД(\Delta P, 2^{j-k}) = 1$ потужність бічних викидів дробиться на велику кількість окремих «піків»

(рис. 5). Якщо $j - k \gg 1$, то співвідношення потужності носійної до потужності бічної складової $C/S \approx 6,02k$ дБн. Моделюючи параметри ті ж самі, що на рис. 4, лише $\Delta P = 265$ співвідношення сигнал/шум складе 48,08 дБ. Незручність модифікації полягає у тому, що воно вводить зміщення у частоту вихідного сигналу ЦОС:

$$f_{\text{відстроїки}} = \frac{f_{\text{тактова}}}{2^{j+1}}, \tag{14}$$

де $f_{\text{тактова}}$ – тактова частота ЦОС. І при цьому відстройка буде незначною, якщо частота відліків буде невисокою, а розрядність фазового суматора великою.

У роботі [2] запропоновано до сигналу фазового акумулятора додавати псевдовипадкову послідовність з великим періодом повторення. Структурна схема запропонованого методу представлена на рис. 6.

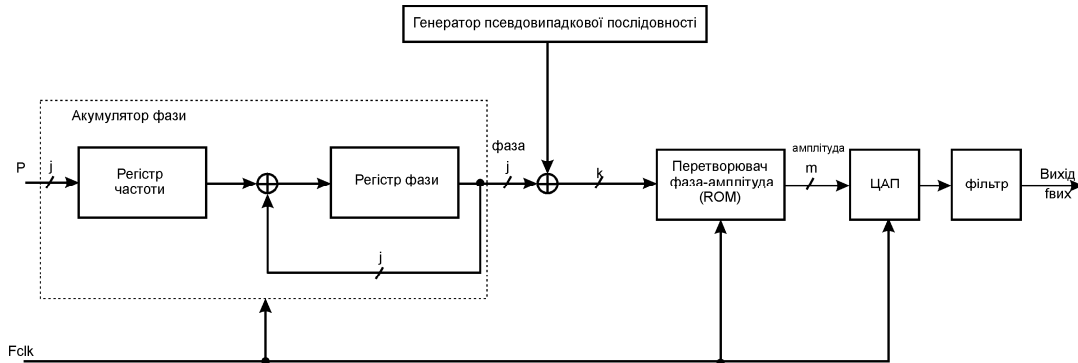


Рис. 6. Додавання псевдовипадкової послідовності до вихідного сигналу фазового акумулятора [2]

Псевдовипадкова послідовність, що синтезована на регістрах зсуву, елементах Виключного-АБО, і має період повторення набагато більший ніж період синтезованого сигналу, додається до значення фазового акумулятора. Цей метод може досягти зменшення бічних складових на 12 дБ. Існують також методи зменшення рівнів бічних складових шляхом додавання псевдовипадкових сигналів до амплітуди вихідного сигналу, а також комбінація цих методів [2]. Недоліком методів, що розглянуті, є зростання загального рівня шумів у синтезаторі. Промодельємо синтезатор, що представлено на рис. 6 у середовищі MATLAB/Simulink. Модель представлено на рис 7.

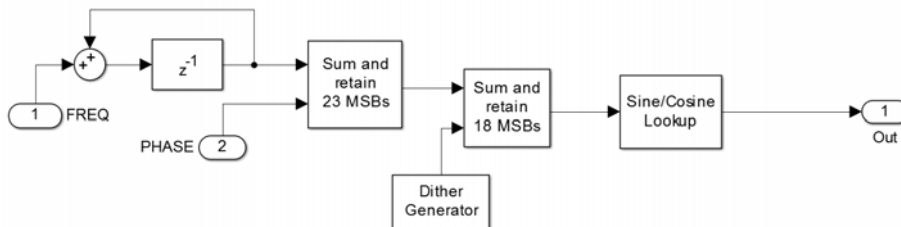


Рис. 7. Імітаційна модель DDS синтезатора у середовищі MATLAB/Simulink із генератором псевдовипадкової послідовності на регістрах зсуву

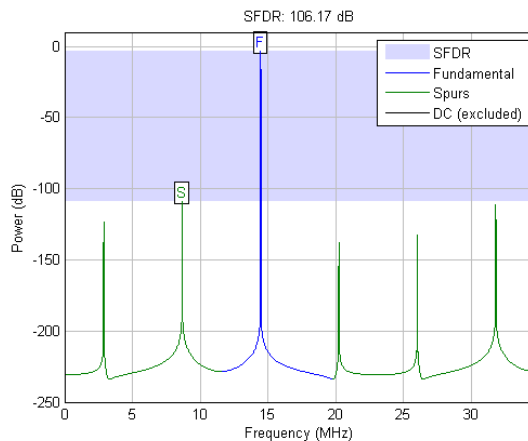


Рис. 8. Імітаційна модель DDS синтезатора у середовищі MATLAB/Simulink без додавання псевдо шумової послідовності

Моделювання роботи DDS синтезатора у середовищі MATLAB\Simulink із генератором псевдовипадкової послідовності на регістрах зсуву дало можливість встановити граничні межі запропонованого методу покращення спектрального складу сигналу. На рис. 8, 9, 10 представлено теоретично досяжні значення смуги SFDR для синтезованої частоти 14,44 МГц.

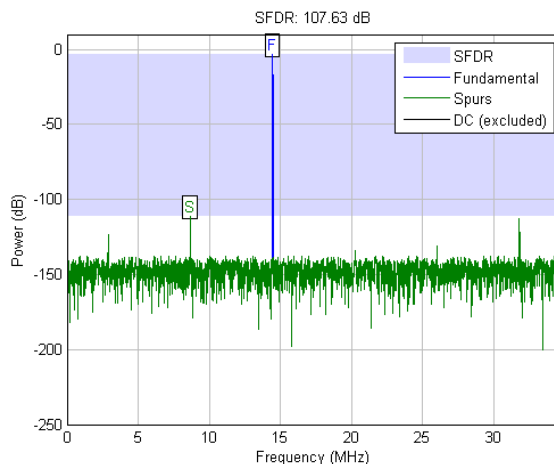


Рис. 9. Імітаційна модель DDS синтезатора у середовищі MATLAB\Simulink із генератором псевдовипадкової послідовності на регістрах зсуву із додаванням трьохбітного джитеру

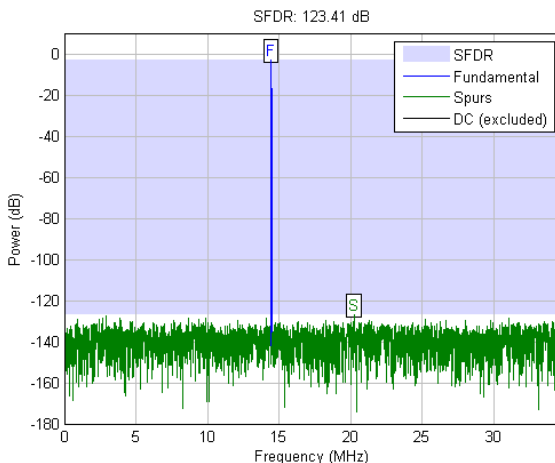


Рис. 10. Імітаційна модель DDS синтезатора у середовищі MATLAB\Simulink із генератором псевдовипадкової послідовності на регістрах зсуву із додаванням п'яти бітного джитеру

Результати моделювання розмістимо у таблиці 1.

Таблиця 1

Значення SFDR (dB) за різного значення глибини (bit) псевдощумової послідовності				
Кількість біт джитеру, що додається	0	3	5	7
SFDR (dB)	106.17	107.63	123.41	113.72

Як видно з таблиці, спостерігається максимум при кількості біт джитеру у 5 біт, після чого рівень псевдо шумових компонентів починає перевищувати потужність окремих спурів. І ширина SFDR починає зменшуватись. Запропонуємо новий підхід до побудови DDS з широким параметром SFDR.

Пропонуємо методом подавлення бічних складових у DDS є додавання вихідних сигналів від багатьох DDS синтезаторів, як це показано на рис. 11.

Від такого методу можна очікувати зменшення рівня бічних складових внаслідок декореляції вихідних сигналів у багатьох каналах. Розглянемо суму двох напруг з різних каналів:

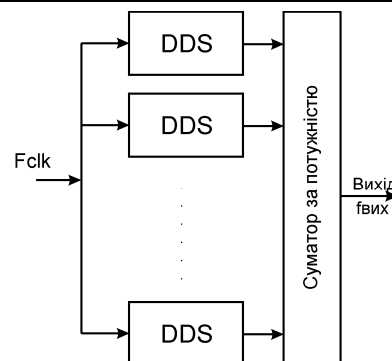


Рис. 11. Паралельна структура синтезатора DDS

$$U(t) = V_1(t) + V_2(t) = U_1 \cos(\omega t + \theta_0 + \varphi_1) + U_2 \cos(\omega t + \theta_0 + \varphi_2). \tag{15}$$

Напруги складаються на резисторі номіналом – 1 Ом, де θ_0 – початкова фаза однакова для усіх каналів, φ_i – випадкова фазова помилка що виникає у конкретному i - каналі синтезатора. Середня розсіявана потужність на вихідному резисторі:

$$P = \frac{1}{2}U_1^2 + \frac{1}{2}U_2^2 + U_1 U_2 \cos(\varphi), \tag{16}$$

де $\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$. Якщо φ_1 та φ_2 – незалежні випадкові величини нормально розподілені від 0 до 2π , тоді сигнали $V_1(t)$ та $V_2(t)$ є некорельованими. Відношення потужностей корельованого сигналу до некорельованого можна визначити так:

$$\frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{2U^2}{U^2} = 2. \tag{17}$$

Розширюючи висновок (17) на N -канальну систему маємо:

$$\frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{N^2 U^2}{N U^2} = N. \tag{18}$$

Отже, застосування у випадку, коли сигнали з синтезаторів є некорельованими, можливий вигреш за потужністю у N разів. Проте у випадку застосування ідентичних каналів у паралельній структурі DDS синтезаторів у випадку надходження однакового кодового слова у кожного з синтезаторів у масиві будуть синтезуватись такі саме помилки. Таким чином на виході масиву когерентно виникнуть такі самі бічні складові, так само підсилені в N разів, як і основна синтезована частота.

Застосуємо метод додавання псевдовипадкової послідовності до паралельної структури синтезаторів DDS. Застосування цього методу до кожного з каналів призведе до того, що шуми кожного індивідуального каналу стануть некогерентними. А отже рівень бічних складових буде подавлено в N раз, а потужність основного вихідного сигналу синтезатора зросте в N раз. Структурна схема синтезатора з додаванням псевдовипадкової послідовності до кожного індивідуального каналу представлена на рис. 12. Застосування цього методу дозволить бічні складові синтезованого сигналу на $20\log N$ дБ. Проте застосування його призведе до значного ускладнення структури синтезатора та нерационального використання апаратних ресурсів. Для спрощення структурної схеми, що запропонована на рис. 13 застосуємо єдиний акумулятор фази для усіх синтезаторів DDS. А вихід цього акумулятора через мультиплексом будемо складати з вихідним сигналом джитер генератора для кожного індивідуального каналу. Відповідно сигнал з суматорів цих каналів буде надходити на постійний запам'ятовуючий пристрій індивідуального каналу, звідки сигнали відліків функції синус надходять на індивідуальний ЦАП кожного каналу.

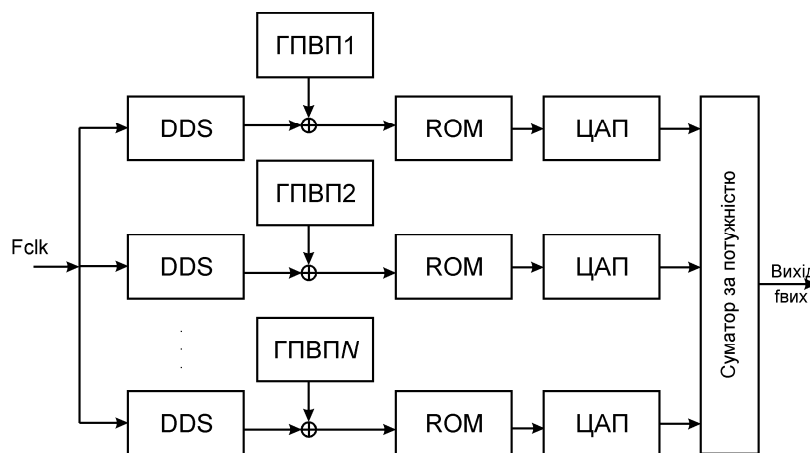


Рис. 12. Структурна схема синтезатора з додаванням псевдовипадкової послідовності до кожного індивідуального каналу

Потужності каналів складаються у суматорі – таким чином формується вихідний сигнал. Така структура може бути реалізована у мікросхемі FPGA технології. У такій структурі вдасться подолати бічні складові, проте такий синтезатор буде вимагати в N раз більший об'єм постійного запам'ятовуючого пристрою ніж одиничний синтезатор, але цей об'єм буде все ж таки меншим ніж об'єм пам'яті синтезатора без процесу відсікання молодших біт фазового слова. Така паралельна структура не призводить до зменшення максимальної частоти синтезу.

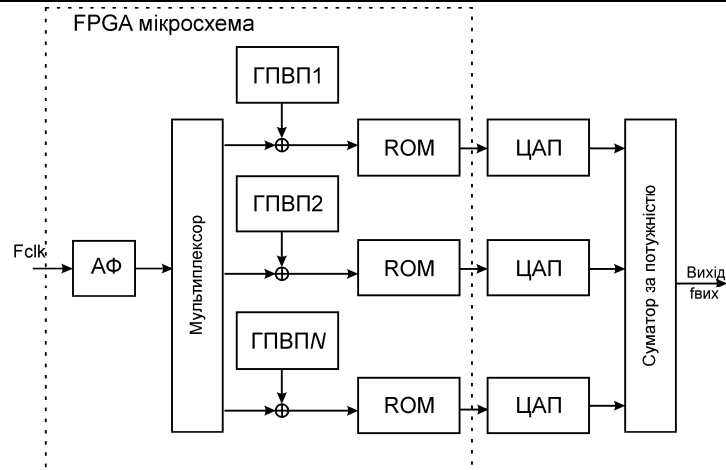


Рис. 13. Структурна схема синтезатора з додаванням псевдовипадкової послідовності до кожного індивідуального каналу із загальним акумулятором фази (АФ)

Проте у деяких випадках зростання об'єму постійного запам'ятовуючого пристрою може бути неприйнятною, через архітектурні особливості конкретних мікросхем ПЛІС. Тому може бути запропонована структурна схема паралельного синтезатору додаванням псевдовипадкової послідовності до кожного індивідуального каналу із загальним акумулятором фази та спільною пам'яттю для зберігання відліків синусоїдальної функції, що представлена на рис. 14. У цій структурі виходи суматорів псевдовипадкових послідовностей з фазовою послідовністю потрапляють у мультиплексор, який направляє їх у єдиний постійний запам'ятовуючий пристрій. Інший мультиплексор необхідний для каскадування виходу ROM на індивідуальні ЦАП кожного каналу. Апаратні затрати на постійну пам'ять у такій структурі будуть зменшені, проте швидкість обробки сигналів впаде в N разів. Це падіння може бути зменшене за рахунок застосування конвеєрної технології, що дозволить майже не зменшувати максимальні синтезовані частоти.

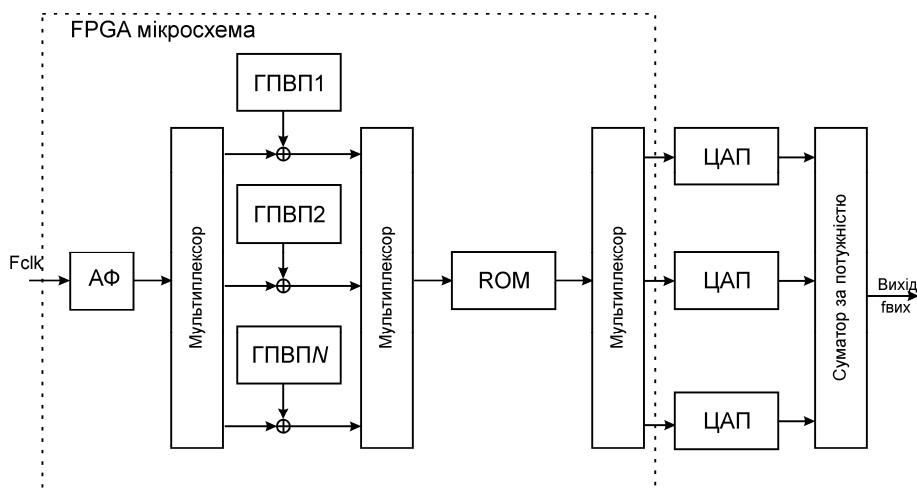


Рис. 14. Структурна схема синтезатора з додаванням псевдовипадкової послідовності до кожного індивідуального каналу із загальним акумулятором фази та спільною пам'яттю для зберігання відліків синусоїдальної функції

Якість синтезованого сигналу у таких синтезаторах буде в основному забезпечуватись якістю вихідних цифро-аналогових перетворювачів (в основному їх нелінійних властивостей).

Іншим ефективним методом подавлення бічних складових у спектрі вихідного сигналу є метод псевдо шумового формування і методика рандомізації, запропонована Вітлі [4].

Пристрій, що складається з накопичувального суматора і генератора випадкових чисел (рис. 15), генерує прямокутні імпульси. Під час кожного переповнення накопичувального суматора до його вмісту додається випадкове число X , $X, 0 < X < K-1$. У той самий час попереднє значення X віднімається. Віднімання виконується таким чином, щоб середнє значення $X(i) - X(i-1)$ перетворювалась в нуль, а середня частота вихідних коливань лишалась такою самою, якою була задана сигналом керування. У результаті під час кожного переповнення накопичувального суматора до його вмісту додається випадкове число $-(K-1)/2 < X' < (K-1)/2$. Зазвичай X формується як послідовність псевдовипадкових чисел, які широко використовують кодування інформації тощо.

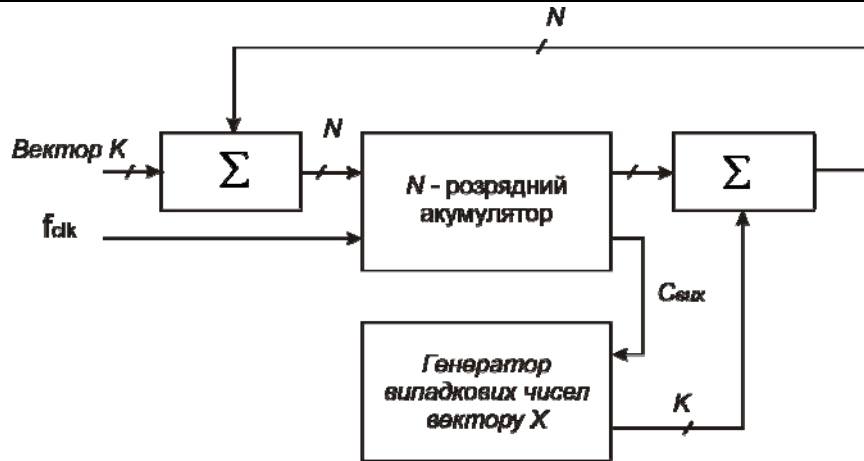


Рис. 15. Структурна схема рандомізатора Вітлі

Щоб проаналізувати результат, позначимо фазову помилку, що викликана дискретністю синтезатора, як e_c , $e_c < K$. Ймовірності того, що у такті T , помилка буде e_c або $T - e_c$, рівні

$$p(e_c) = e_c / K ;$$

$$p(T - e_c) = 1 - e_c / K .$$

Середнє значення помилки затримки:

$$\tau_{cp} = \tau p(e_c) + (T - \tau) p(T - e_c) . \tag{19}$$

Таким чином, у середньому переповнення накопичувального суматора синтезатора, що використовує схему рандомізованої модуляції фази, відбувається у ті самі моменти часу, що і у звичайному синтезаторі. Це означає, що середній період синтезованої частоти не залежить від миттєвих значень вмісту накопичувального суматора, тому вихідна частота цього синтезатора однозначно і точно визначається значенням коду частоти. При цьому важливим є той факт, що час настання переповнення суматора не залежить від початкової фазової помилки. Це означає, що навіть якщо сусідні значення фазової помилки на початковому етапі корельовані, додавання випадкової величини X не впливає на середній час переповнення накопичувального суматора і усі бічні дискретні лінії у спектрі, що виникають внаслідок когерентності похибки, ліквідовуються. Таким чином, на виході замість дискретних бокових ліній буде з'являтися неперервний шум, пов'язаний з випадковістю між моментами перемикавання накопичувального суматора. При цьому максимальний рівень бічних складових знижується. Ця процедура може перетворити усю енергію паразитного сигналу в енергію фазового шуму. Відношення спектральної густини шуму до потужності корисної гармоніки складає

$$\frac{N_0}{C} = \frac{\pi^2 f}{f_{clk}} , \tag{20}$$

де f_{clk} – тактова частота синтезатора.

Новизна процедури Вітлі полягає у її принципі; проте її важко реалізувати, особливо у високошвидкісній логіці, тому практичне значення цього методу було обмежене.

Найбільшою перепоною на шляху реалізації методу Вітлі лежить обмежена швидкодія суматорів, які використовуються як у структурі накопичувального суматора так і у колах додавання/віднімання псевдовипадкових чисел. Реальне застосування цього методу можливе лише із застосуванням суматорів, які здатні додавати числа за один або кілька тактів. Такі суматори будуються на принципах, що закладені у теорії системи залишкових класів [7].

Аналіз структури операційного пристрою [8] сумування в системі залишкових класів показує, що при використанні суматорів з розрядністю $k = 16-64$ швидкодія у системі залишкових класів перевищує швидкодю суматорів у класичній бінарній системі в 5–9 разів. Застосування системи залишкових класів у структурі фазового акумулятора DDS синтезатора, що представлено на рис. 15 дасть можливість наблизитись до теоретичного максимуму співвідношення сигнал/шум у DDS синтезаторах.

Висновки

Розглянуто принципи організації прямих цифрових синтезаторів частоти – DDS. Виконано математичний аналіз функціонування основних елементів такого синтезатора. Розглянуто основні джерела похибок, що виникають у таких синтезаторах. Розглянуто можливості застосування паралельних структур для зменшення загального рівня шумів, та абсолютних рівнів бічних складових основного синтезованого сигналу. Отже застосування паралельних структур цифрових синтезаторів прямого синтезу DDS значно покращує шумові характеристики синтезаторів, проте ускладнює їх внутрішню будову. Розглянуто кілька методів спрощення паралельних синтезаторів прямого цифрового синтезу. Запропоновані синтезатори можуть бути використані у апаратурі, до якої висуваються вимоги високої точності синтезу частоти з одночасним забезпеченням спектральної чистоти синтезованого сигналу.

Розглянуто методи та способи зменшення бічних спектральних складових у вихідному спектрі класичного обчислювального синтезатора на основі накопичувального суматора. Виявлено, що можливо побудувати синтезатор із високими тактико-технічними характеристиками за рахунок використання алгоритму Вітлі. Розглянуто можливості застосування нових математичних підходів для побудови суматорів без проблеми затримки поширення сигналів переносу із розряду у розряд кодового слова. Наведений математичний апарат дозволить побудувати цифровий обчислювальний синтезатор із меншими рівнями бічних складових у спектрі вихідного сигналу, за рахунок деякого ускладнення внутрішньої будови синтезатора із використанням двох додаткових суматорів та генератора псевдовипадкових чисел.

Література

1. Grayver, Eugene. (2013). Implementing Software Defined Radio. Implementing Software Defined Radio. 9–35. 10.1007/978-1-4419-9332-8_3.
2. Vankka J. Direct Digital Synthesizers: Theory, Design and Applications / J. Vankka // Helsinki University of Technology. – 2000. – S. 192.
3. Yuanwang Yang, Jingye Cai A Novel DDS Structure with Low Phase Noise and spurs / Yuanwang Yang // UESTC, Chengdu. – 2011.
4. Byung-Do Yang, Jang-Hong Choi, Seon-Ho Han. An 800-MHz Low-Power Direct digital Frequency synthesizer With an On-Chip D/A converter. *IEEE Journal of solid-state circuits*, 2004, vol. 39, 5. DOI: 10.1109/JSSC.2004.826323
5. D. E. Calbaza and Y. Savaria, "Jitter model of direct digital synthesis clock generators," ISCAS'99. Proceedings of the 1999 IEEE International Symposium on Circuits and Systems VLSI (Cat. No.99CH36349), Orlando, FL, 1999, pp. 1–4, vol. 1. DOI: 10.1109/ISCAS.1999.7777913
6. P.V. Ananda Mohan Residue Number Systems. Theory and Applications. Birkhäuser Basel. X, 351. DOI 10.1007/978-3-319-41385-3
7. "The new type of phase accumulator for DDS", *Microwave and Telecommunication Technology (CriMiCo)*, 2007 17th International Crimean Conference. DOI: 10.1109/CRIMICO.2007.436871

Рецензія/Peer review : 14.2.2019 р.

Надрукована/Printed : 10.4.2019 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Бойко Ю.М.

О. В. ОСАДЧУК, В. С. ОСАДЧУК, Я. О. ОСАДЧУК
Вінницький національний технічний університет

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ГАЗОРЕАКТИВНОГО ЕФЕКТУ В НАПІВПРОВІДНИКОВИХ СЕНСОРАХ ГАЗУ

В роботі розглянуто математичну модель газореактивного ефекту в первинних газочутливих напівпровідникових сенсорах, що описує залежність активної складової повного опору приповерхневого шару напівпровідникового газочутливого елемента під час адсорбції молекул газу. Надлишкові носії заряду при адсорбції змінюють розподіл електростатичного поверхневого потенціалу в шарі просторового заряду. Розв'язок рівняння Пуассона дозволив отримати вирази для активної складової повного опору на поверхні електронного та діркового напівпровідників газочутливих сенсорів при адсорбції молекул газу. Представлено експериментальну залежність зміни опору напівпровідникового газочутливого сенсора на основі ZnO від зміни концентрації ацетилену.

Ключові слова: напівпровідникові сенсори газу, газореактивний ефект, реактивні властивості напівпровідників, повний опір, приповерхневий шар.

A. V. OSADCHUK, V. S. OSADCHUK, I. A. OSADCHUK
Vinnytsia National Technical University

MATHEMATICAL MODEL OF A GAS-REACTIVE EFFECT IN GAS SEMICONDUCTOR SENSORS

The paper considers a mathematical model of the gas-jet effect in primary gas-sensitive semiconductor sensors, describing the dependence of the active component of the total resistance of the surface layer of a semiconductor gas-sensitive element during adsorption of gas molecules. Excessive charge carriers during adsorption change the distribution of the electrostatic surface potential in the space charge layer. Solving the Poisson equation made it possible to obtain expressions for the active component of the impedance on the surface for electron and hole semiconductors of gas-sensitive sensors upon adsorption of gas molecules. Experimental dependences of the change in the resistance of a semiconductor gas sensitive sensor based on ZnO on the change in the concentration of acetylene are presented. The change in the active component of the full-surface superstructure of primary semiconductor gas sensors in the adsorption of gas molecules is due to the variable surface potential, which is uniquely associated with the measured gas concentration.

Keywords: semiconductor gas sensors, gas-reactive effect, reactive properties of semiconductors, impedance, near-surface layer.

Вступ

Характеристики перетворювачів визначають точність і надійність систем управління і регулювання приладів контролю технологічних процесів, характеристик навколишнього середовища, безпеку роботи промислових установок тощо. Тому для газових перетворювачів висуваються жорсткі вимоги. Вони повинні бути економічними, забезпечувати високу точність вимірювання, мати мінімальні габарити, вагу та енергоспоживання, бути сумісними з сучасними ЕОМ та мати можливість виготовлення за стандартною інтегральною технологією [1–4].

На теперішній день існуючі напівпровідникові сенсори газу не задовольняють вищезначеним вимогам. Вони мають низький вихідний сигнал, низьку точність і чутливість, вимагають аналого-цифрові перетворювачі і підсилювальні пристрої при подальшій обробці сигналу. Перспективним науковим напрямком, що дозволяє усунути недоліки існуючих аналогових сенсорів газу, є створення перетворювачів, які реалізують принцип перетворення «концентрація газу – частота» на основі автогенераторних напівпровідникових структур з від'ємним диференційним опором.

Розробка автогенераторних перетворювачів газу з частотним вихідним сигналом вимагає знань зміни повного опору первинних напівпровідникових перетворювачів газу від зміни концентрації газу, тобто, газореактивного ефекту, оскільки ці процеси викликають зміни параметрів коливального контуру автогенераторів, що, у свою чергу, визначає залежність вихідної частоти пристроїв [5–8]. Таким чином, робота присвячена дослідженню математичної моделі газореактивного ефекту в напівпровідникових сенсорах газу, тобто, залежності їх повного вихідного опору від концентрації газу, який визначається процесами на поверхні напівпровідника.

Математична модель газореактивного ефекту в напівпровідникових сенсорах газу

В 1954 році німецьким вченим Гайландом [9] при дослідженні поведінки окисних напівпровідників під дією газу було встановлено, що на поверхні змінюється їх електрична провідність. На основі цього ефекту розроблено велику кількість резистивних сенсорів для вимірювання концентрацій різноманітних газів. Залежність зміни провідності від молекулярної концентрації хімічної речовини може приймати значну величину в напівпровідникових сенсорах, при цьому широке застосування як сенсори газу знайти наступні напівпровідникові оксиди металів в (табл. 1) [10].

При каталітичному окислюванні газами типу H_2 , CH_4 , C_2H_5OH , H_2S , що виступають як гази окиснювачі, на поверхні твердого тіла ефективно збільшується позитивна валентність адсорбційного комплексу, тому що при реакції на тверду поверхню віддаються електрони. Унаслідок чого на поверхні збільшується концентрація електронів, що приводить до того, що в напівпровідниках n-типу провідності заряд виникає завдяки процесу збагачення, а в напівпровідниках p-типу провідності – завдяки збідненню [11].

Напівпровідникові оксиди металів для використання в газових сенсорах

Гази, які визначаються	Оксиди у відповідних напівпровідникових сенсорах
H ₂ O	Cr ₂ O ₃ , TiO ₂ , Fe ₂ O ₃ , ZnO, LiMn ₂ O ₄
O ₂	TiO ₂ , Fe ₂ O ₃ , CoO, ZnO, ZrO ₂ , SnO ₂ , SrTiO ₃ , BaTiO ₃ , La ₂ O ₃
Co	Cr ₂ O ₃ , NiO, ZnO, ZrO ₂ , SnO ₂ , In ₂ O ₃
CH ₄	Fe ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₄ , Co ₃ O ₄ , ZnO, In ₂ O ₃
Інші вуглеводні	Ga ₂ O ₃ , CdO, PdO, WO ₂ , MnO ₂ , MoO _t , CuO, NiO, VO ₂ , V ₃ O ₈
NO _x	SnO ₂ , V ₂ O ₅ , VO
H ₂	CO ₃ O ₄ , ZnO, SnO ₂ , WO ₃ , MnO ₂ , MoO ₃
Галогени	ZnO, Al ₂ O ₃ , SnO ₂

В залежності від сил, що зв'язують адсорбційні частинки з поверхнею напівпровідника, має місце фізична та хімічна адсорбція. Фізична адсорбція визначається силами електростатичного походження (сили Ван-дер-Ваальса, сили електричного зображення) і енергія зв'язку в цьому випадку складає 0,01-0,1eВ. Хімічна адсорбція виникає, коли адсорбовані молекули зв'язані з напівпровідником силами обмінного типу. В цьому випадку енергія зв'язку при хемосорбції є значною та досягає 1eВ. Отже, внаслідок адсорбції газу в напівпровіднику виникають додаткові поверхневі стани. Енергетичні рівні поверхневих станів розташовуються в забороненій зоні значно нижче дна зони провідності або вище валентної зони [12]. Поверхневий заряд притягує носії заряду з об'єму напівпровідника в приповерхневу область, що приводить до виникнення подвійного зарядженого шару. Наявність у напівпровідника поверхневого заряду змінює його енергетичну схему у приповерхневій області.

Зразок напівпровідника у нормальних умовах повинен бути електрично нейтральним. Звідки витікає, що поверхневий заряд $Q_{нов}$ повинен бути скомпенсовано рівним по величині і зворотнім за знаком зарядом у приповерхневому шарі напівпровідника. Цей заряд, який екранує об'єм напівпровідника від проникнення в нього електричного поля, складається в загальному випадку з розташованих в об'ємі напівпровідника іонізованих донорів і акцепторів та рухливих електронів і дірок. Таким чином, приповерхневий шар напівпровідника є шаром просторового заряду, який екранує об'єм напівпровідника від поля поверхневого заряду, причому це екранування здійснюється за рахунок того, що рівноважні концентрації електронів і дірок в шарі відрізняються від об'ємних.

Розподіл електростатичного потенціалу в шарі просторового заряду визначається рівнянням Пуассона. Більш повний і точний розв'язок цієї задачі зроблено в роботі К. Гаретта і Братейна, переклад якої дано в [13]. В подальшому будемо виходити з найбільш розповсюдженого варіанту розрахунків, викладеного в монографії А.В. Ржанова [14]. В цій роботі розглядається загальний випадок напівпровідника під дією збуджуючого фактора постійного у часі, наприклад, освітлення, прониклива радіація. Відповідно, термодинамічну рівновагу в такому напівпровіднику порушено і концентрація носіїв заряду: n -електронів і p -дірок перевищують термодинамічно рівноважні величини n_0 і p_0 . В будь-якій точці напівпровідника ці значення концентрацій при відсутності виродження визначаються статистикою Больцмана і можуть наступним чином бути виражені через квазірівні Фермі φ_n і φ_p та електростатичний потенціал ψ [14]

$$p = n_i e^{\frac{q(\varphi_p - \psi)}{kT}}, \quad n = n_i e^{\frac{q(\psi - \varphi_n)}{kT}}, \quad (1)$$

де n_i – концентрація носіїв заряду у власному напівпровіднику; q – заряд електрона; k – стала Больцмана; T – абсолютна температура.

Квазірівні Фермі мають властивості електрохімічного потенціалу. При термодинамічній рівновазі $\varphi_p = \varphi_n = \varphi_0$, а концентрації носіїв заряду мають при цьому рівноважні значення в усіх точках, в тому числі і поблизу поверхні.

Електростатичний потенціал ψ є мірою потенціальної енергії електрона у шарі просторового заряду і характеризує викривлення енергетичних зон кристала у цій області. Потенціал поза поверхневого шару просторового заряду, при $x \rightarrow \infty$, позначається як ψ_0 і обирається його значення таким чином, щоб потенціальна енергія електрона всередині кристала $q\psi_0$ співпадала із значенням енергії Фермі у власному напівпровіднику E_i . Цю величину називають серединою забороненої зони в об'ємі і на поверхні напівпровідника. Значення електростатичного потенціалу всередині приповерхневого шару просторового заряду тоді буде характеризуватися величиною $q(\psi_s - \psi_0)$, як показано на рис. 1. Розташування рівноважного рівня Фермі в об'ємі напівпровідника буде визначатися величиною $q\varphi_0 = q(\varphi_0 - \psi_0)$, за допомогою якої визначаються об'ємні рівноважні концентрації дірок і електронів [14]

$$p_0 = n_i e^{\frac{q\varphi_0}{kT}}, \quad n_0 = n_i e^{-\frac{q\varphi_0}{kT}}. \quad (2)$$

Розташування рівня Фермі на поверхні напівпровідника визначається величиною $q\varphi_s = q(\varphi_0 - \psi_s)$, через яку визначаються поверхневі концентрації носіїв заряду

$$p_s = n_i e^{\frac{q\varphi_s}{kT}}, \quad n_s = n_i e^{-\frac{q\varphi_s}{kT}}, \quad (3)$$

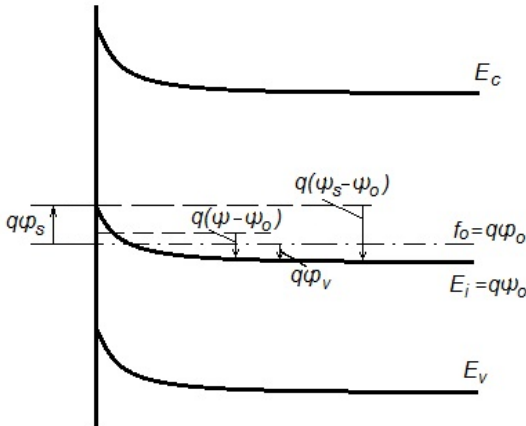


Рис. 1. Енергетична схема приповерхневого шару просторового заряду [12]

величину $q\varphi_s$ звичайно називають поверхневим потенціалом, на відзнаку від поверхневого електростатичного потенціалу $q(\psi_s - \psi_0)$.

Знак електростатичного потенціалу у відповідності з співвідношенням (1) і (3) буде від'ємним, якщо зони поблизу поверхні вигнуті догори, і позитивним, якщо вони вигнуті донизу. Відповідно знаки потенціалів φ_v і φ_s будуть від'ємні, якщо рівень Фермі розташовано у верхній половині забороненої зони в об'ємі або в нижній на поверхні. На рис. 1 наведено випадок, коли $q(\psi_s - \psi_0)$ і $q\varphi_v$ мають від'ємний знак, а $q\varphi_s$ – позитивний.

Розглянемо розв'язок рівняння Пуассона для напівбезкінечного напівпровідника. Для одновимірного випадку воно має вигляд [12,14]

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = -\frac{4\pi}{\varepsilon\varepsilon_0} \rho(x), \quad (4)$$

де ε – діелектрична стала напівпровідника; ε_0 – діелектрична стала вакууму; $\rho(x)$ – щільність об'ємного заряду у точці напівпровідника, яка віддалена на відстані x від його поверхні.

Граничні умови для розв'язку рівняння описуються формулами

$$\left. \begin{aligned} \psi &= \psi_s \text{ при } x = 0, \\ \psi &= \psi_0 \text{ і } \frac{d\psi}{dx} = 0 \text{ при } x \rightarrow \infty. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Вважаємо, що домішки розподілено по об'єму напівпровідника однорідно і всі вони іонізовані, тоді щільність об'ємного заряду у будь-якій точці напівпровідника описується рівнянням

$$\rho(x) = q(N_d - N_a + p - n), \quad (6)$$

де N_d і N_a концентрації іонізованих донорів і акцепторів.

Оскільки умова електричної нейтральності поза поверхневим шаром просторового заряду описується у вигляді

$$N_d - N_a + p_0 - n_0 = 0, \quad (7)$$

де p_0 і n_0 рівноважні об'ємні концентрації дірок і електронів, тому рівняння (6) приймає вигляд

$$\rho(x) = q[(p - p_0) - (n - n_0)]. \quad (8)$$

При підстановці (1) – (3) у рівняння (8) отримуємо

$$\rho(x) = qn_i \left[e^{\frac{q(\varphi_p - \psi)}{kT}} - e^{\frac{q(\varphi_0 - \psi_0)}{kT}} - e^{\frac{q(\psi - \varphi_n)}{kT}} + e^{\frac{q(\psi_0 - \varphi_0)}{kT}} \right]. \quad (9)$$

З врахуванням виразу (9) рівняння Пуассона (4) приймає вигляд

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = -\frac{2\pi q n_i}{\varepsilon\varepsilon_0} \left[e^{\frac{q(\varphi_p - \psi)}{kT}} - e^{\frac{q(\varphi_0 - \psi_0)}{kT}} - e^{\frac{q(\psi - \varphi_n)}{kT}} + e^{\frac{q(\psi_0 - \varphi_0)}{kT}} \right]. \quad (10)$$

Якщо вважати, що квазірівні Фермі φ_p і φ_n майже не змінюються з координатою всередині приповерхневої області просторового заряду, то рівняння (10) має тільки величину ψ , яка залежить від координати x . Для інтегрування рівняння Пуассона зручно ввести безрозмірний електростатичний потенціал [14]

$$y = \frac{q}{kT}(\psi - \psi_0), \quad (11)$$

а також безрозмірну величину γ , яка характеризує об'ємні властивості зразка напівпровідника

$$\gamma = \left(\frac{p_0}{n_0} \right)^{1/2} = \frac{p_0}{n_i} = \frac{n_i}{n_0} = e^{\frac{q(\varphi_0 - \psi_0)}{kT}} = e^{\frac{q}{kT}\varphi_v}. \quad (12)$$

З виразу (12) витікає, що γ дорівнює одиниці для власного напівпровідника. Вона буде більше одиниці, чим сильніше виявляється діркова провідність в даному зразку напівпровідника і, отже, чим нижче розташовано рівноважний рівень Фермі по відношенню до рівня потенціалу ψ_0 . Вона тим менше одиниці, чим сильніше виявляється електронна провідність зразка і, відповідно, чим вище розташовано рівноважний

рівень Фермі по відношенню до рівня потенціалу ψ_0 . Таким чином, величина γ однозначно характеризує співвідношення рівноважних концентрацій носіїв заряду в об'ємі зразка напівпровідника.

Необхідно також ввести безрозмірну величину, яка характеризує ступень відхилення концентрації носіїв заряду від їх рівноважних значень в об'ємі напівпровідника. Якщо процеси захоплення надлишкових носіїв заряду в об'ємі напівпровідника відсутні, то ступень порушення термодинамічної рівноваги в напівпровіднику може бути визначена безрозмірним рівнем інжекції, яке має вигляд

$$\alpha = \frac{\Delta n}{n_i} = \frac{\Delta p}{n_i}, \quad (13)$$

де $\Delta n = \Delta p$ – надлишкова концентрація носіїв заряду в об'ємі напівпровідника за межами приповерхневої області просторового заряду. В цьому випадку $\psi = \psi_0$ і з врахуванням (1) можна встановити зв'язки між рівнем інжекції α і відстанями між квазірівнем і рівнем Фермі $(\varphi_p - \varphi_0)$ і $(\varphi_0 - \varphi_n)$ [14]

$$e^{\frac{q}{kT}(\varphi_p - \varphi_0)} = \alpha \gamma^{-1} + 1 = \frac{\Delta p}{p_0} + 1, \quad (14)$$

$$e^{\frac{q}{kT}(\varphi_0 - \varphi_n)} = \alpha \gamma + 1 = \frac{\Delta n}{n_0} + 1. \quad (15)$$

З використанням введених безрозмірних величин рівняння Пуассона приймає вигляд [14]

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = -\frac{4\pi q^2 n_i}{kT \epsilon \epsilon_0} [(\alpha + \gamma) e^{-y} - (\alpha + \gamma^{-1}) e^y - (\gamma + \gamma^{-1})]. \quad (16)$$

Рівняння (16) розв'язується методом розподілу змінних, при цьому права і ліва частини рівняння помножуються на $2(dy/dx)$ з використанням граничної умови $dy/dx = 0$ при $y = 0$. Таким чином, можна записати

$$2 \int_0^{\left(\frac{dy}{dx}\right)^2} d\left(\frac{dy}{dx}\right)^2 = -\frac{8\pi q^2 n_i}{kT \epsilon \epsilon_0} \int_0^y [(\alpha + \gamma) e^{-y} - (\alpha + \gamma^{-1}) e^y - (\gamma + \gamma^{-1})] dy. \quad (17)$$

Інтегрування виразу (17) дозволяє отримати значення

$$\frac{dy}{dx} = \left[\frac{8\pi q^2 n_i}{kT \epsilon \epsilon_0} \right]^{1/2} [(\alpha + \gamma)(e^{-y} - 1) + (\alpha + \gamma^{-1})(e^y - 1) + (\gamma - \gamma^{-1})y]^{1/2}. \quad (18)$$

Для спрощення запису виразу (18) введемо такі позначення

$$f(y, \gamma, \alpha) = \mp [(\alpha + \gamma)(e^{-y} - 1) + (\alpha + \gamma^{-1})(e^y - 1) + (\gamma - \gamma^{-1})y]^{1/2}, \quad (19)$$

$$f(y, \gamma) = \mp [\gamma(e^{-y} - 1) + \gamma^{-1}(e^y - 1) + (\gamma - \gamma^{-1})y]^{1/2}, \quad (20)$$

$$L_D = \left[\frac{kT \epsilon \epsilon_0}{2\pi q^2 n_i} \right]^{1/2}. \quad (21)$$

Таким чином, формула (18) з врахуванням (19)-(20) приймає вигляд

$$\frac{dy}{dx} = \frac{2}{L_D} f(y, \gamma, \alpha), \quad (22)$$

а при умові термодинамічної рівноваги системи

$$\frac{dy}{dx} = \frac{2}{L_D} f(y, \gamma). \quad (23)$$

У формулах (19) і (20) від'ємному знаку перед квадратною дужкою відповідають позитивні, а позитивному знаку – від'ємні значення безрозмірного електростатичного потенціалу y . Величина L_D має розмірність довжини і за своїм фізичним сенсом аналогічна дебаївській довжині екранування. Вираз (21) визначає довжину екранування електричного поля поверхневого заряду у власному напівпровіднику.

Формула (22) визначає напруженість електричного поля в будь-якій точці приповерхневої області просторового заряду в напівпровіднику, в тому числі і на його поверхні, яка є границею цієї області. Слід зауважити, що заряд у приповерхневому шарі просторового заряду $Q_{np.zar}$ однозначно зв'язаний з напруженістю поля на границі шару. В загальному випадку цей зв'язок визначається таким виразом [14]

$$-Q_{нов} = Q_{np.zar} = \frac{\epsilon \epsilon_0}{4\pi} \left. \frac{d\psi}{dx} \right|_{x=0} = q n_i L_D f(y_s, \gamma, \alpha), \quad (24)$$

а при термодинамічній рівновазі

$$-Q_{нов} = Q_{np.zar} = q n_i L_D f(y_s, \gamma), \quad (25)$$

де $y_s = \frac{q}{kT}(\psi_s - \psi_0)$ – значення безрозмірного електростатичного потенціалу на поверхні напівпровідника.

У відповідності з прийнятими умовами, знаки функцій $f(y_s, \gamma, \alpha)$ і $f(y_s, \gamma)$ відповідають знаку заряду в шарі просторового заряду $Q_{пр.зар}$. З другого боку, поверхневий заряд $Q_{нов}$, який розташовано у поверхневих станах, при відсутності зовнішнього електричного поля дорівнює по величині, проте зворотній по знаку заряду в шарі просторового заряду. Отже, вирази (24) і (25) встановлюють прямий зв'язок між величиною і знаком сумарного заряду в приповерхневій області напівпровідника і величиною та знаком поверхневого електростатичного потенціалу y_s , який визначає будову області просторового заряду. На рис. 2 подано приклади цього зв'язку для випадку термодинамічної рівноваги ($\alpha = 0$) і різних значень параметра γ

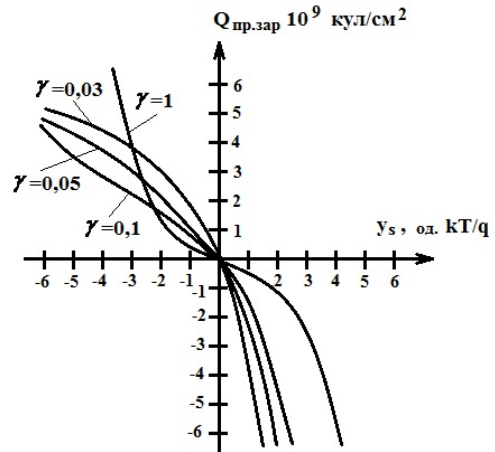


Рис. 2. Заряд в шарі просторового заряду залежно від поверхневого електростатичного потенціалу y_s при різних значеннях параметра γ

Існування поверхневого заряду приводить до появи потенціального бар'єру у приповерхневій області напівпровідника, який обумовлено утворенням в ній області просторового заряду. Висота і знак цього потенціального бар'єру характеризується поверхневим електростатичним потенціалом y_s . Для визначення форми приповерхневого потенціального бар'єру необхідно визначити другий інтеграл рівняння Пуассона. Формула (22) для власного напівпровідника при рівноважних умовах, коли $\gamma = 1, \alpha = 0$, буде мати вигляд [14]

$$\frac{dy}{dx} = \mp \frac{2}{L_D} [e^{-y} + e^y - 2]^{1/2} = \mp \frac{4}{L_D} sh\left(\frac{y}{2}\right). \quad (26)$$

Інтегрування виразу (26) при граничних умовах $x = 0, y = y_s$

$$\int_0^x \frac{dx}{L_D} = \frac{1}{4} \int_{y_s}^y \frac{dy}{\mp sh\left(\frac{y}{2}\right)}, \quad (27)$$

дозволяє отримати формулу [14]

$$\frac{2x}{L_D} = \ln \frac{th\left(\frac{y_s}{4}\right)}{th\left(\frac{y}{4}\right)}, \quad (28)$$

яку можна записати в іншому вигляді

$$th(y/4) = th(y_s/4) \exp\left(-\frac{2x}{L_D}\right). \quad (29)$$

Аналіз формули (29), яка описує залежність зміни електростатичного потенціалу з відстанню від поверхні власного напівпровідника, показує, що електростатичний потенціал відносно швидко змінюється в області малих відстаней від поверхні, причому тим швидше, чим більша абсолютна величина поверхневого електростатичного потенціалу y_s і значно повільніше в області великих відстаней від поверхні.

В загальному випадку домішкового напівпровідника другий інтеграл рівняння Пуассона в рівноважних умовах не можна отримати в аналітичному вигляді, проте його визначають чисельним методом [14].

Основний внесок в зміну газореактивного ефекту в напівпровідникових сенсорах газу, тобто зміна повного опору чутливого елемента при дії різноманітних газів, є зміна активної складової повного опору, тому розглянемо зміну поверхневого опору або зміну поверхневої провідності газочутливого сенсора.

Поверхнева провідність визначається як сума поверхневих надлишок електронів і дірок, яка помножена на відповідні рухливості і величину заряду електрона [14]

$$G_s(y_s, \gamma, \alpha) = \frac{1}{2} q n_i \mu_{ps} L_D \int_{y_s}^0 \frac{(\gamma + \alpha)(e^y - 1) + b_s(\gamma^{-1} + \alpha)(e^y - 1)}{f(y, \gamma, \alpha)} dy, \quad (30)$$

де $b_s = \mu_{ns} / \mu_{ps}$ – відношення рухливостей електронів і дірок в приповерхневому шарі. У випадку термодинамічної рівноваги, коли $\alpha = 0$, поверхнева провідність має вигляд

$$G_s(y_s, \gamma) = \frac{1}{2} q n_i \mu_{ps} L_D \int_{y_s}^0 \frac{\gamma(e^{-y} - 1) + b_s \gamma^{-1}(e^y - 1)}{f(y, \gamma)} dy. \quad (31)$$

Інтегралі, які входять в співвідношення (30) і (31) аналітично не беруться і розраховуються чисельним методом. Якісно поведінку залежності поверхневої провідності G_s від поверхневого електростатичного потенціалу y_s можна пояснити наступним чином. Будемо розглядати напівпровідник з електронним типом провідності при великих позитивних значеннях y_s , коли в приповерхневому шарі існує збагачення та великий надлишок електронів. Цей надлишок електронів буде визначати поверхневу провідність, яка експоненціально залежить від $y_s/2$. При зменшенні показника y_s відбувається зменшення поверхневої провідності G_s за експоненціальним законом.

В області малих позитивних значень y_s зменшення величини G_s уповільнюється, оскільки в заряді шару просторового заряду все більшу роль починає відігравати заряд іонізованих донорів.

Приблизні аналітичні значення інтегралів у виразах (30) і (31) можна отримати при великих абсолютних значеннях поверхневого електростатичного потенціалу, коли функція $f(y, \gamma, \alpha)$ зводиться до однієї складової. Таким чином, при великому позитивному значенні поверхневого електростатичного потенціалу поверхнева провідність електронного напівпровідника описується виразом [14]

$$G_{sn} = \frac{1}{2} q n_0 \mu_{ns} L_D (\gamma^{-1} + \alpha)^{1/2} e^{y_s/2}, \quad (32)$$

а для діркового напівпровідника при великому від'ємному значенні поверхневого електростатичного потенціалу

$$G_{sp} = \frac{1}{2} q p_0 \mu_{ps} L_D (\gamma + \alpha)^{1/2} e^{-y_s/2}, \quad (33)$$

Поверхневий опір для електронного напівпровідника на основі виразу (32) має вигляд

$$R_{sn} = \left[\frac{1}{2} q n_0 \mu_{ns} L_D (\gamma^{-1} + \alpha)^{1/2} e^{y_s(W)/2} \right]^{-1}, \quad (34)$$

а для діркового напівпровідника на основі (33) описується формулою

$$R_{sp} = \left[\frac{1}{2} q p_0 \mu_{ps} L_D (\gamma + \alpha)^{1/2} e^{-y_s(W)/2} \right]^{-1}, \quad (35)$$

де W – концентрація газів, які діють на сенсор.

Аналіз формул (34) і (35) показує, що поверхневий опір газових напівпровідникових сенсорів експоненціально залежить від поверхневого електростатичного потенціалу, який, в свою чергу, однозначно зв'язаний з концентрацією діючих газів, що підтверджують експериментальні дослідження. На рис. 3 надано експериментальну залежність опору напівпровідникового газочутливого сенсору на основі ZnO від концентрації ацетилену.

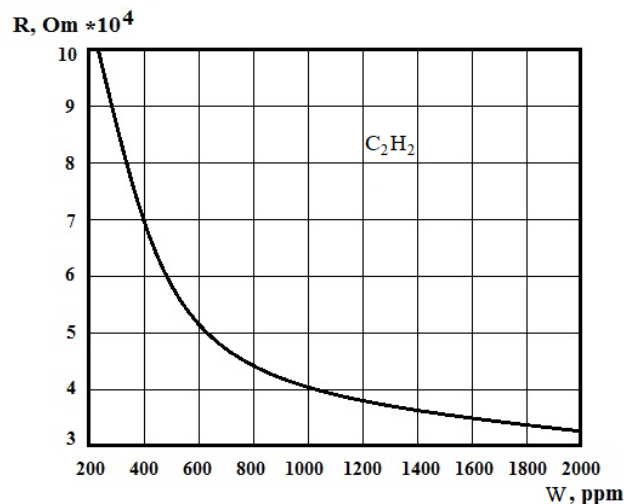


Рис. 3 Експериментальна залежність опору напівпровідникового газочутливого сенсору на основі ZnO від концентрації ацетилену

Висновки

1. Математична модель газореактивного ефекту в первинних напівпровідникових газових сенсорах описує залежність повного приповерхневого опору від дії газу (в нашому випадку залежність його активної складової), яка визначається фізичними процесами на поверхні напівпровідника, що описуються розподілом електростатичного потенціалу в шарі просторового заряду на основі рівняння Пуассона. Розв'язок рівняння Пуассона дозволив визначити залежність зміни активної складової повного опору приповерхневого шару від заряду на поверхні електронного та діркового напівпровідників при адсорбції молекул газу.

2. Зміна активної складової повного опору приповерхневого шару первинних напівпровідникових

газових сенсорів при адсорбції молекул газу пов'язана із змінною поверхневого потенціалу, який однозначно зв'язаний з вимірюваною концентрацією газу.

Література

1. Мікроелектронні сенсори фізичних величин / за ред. З. Ю. Готри. – Львів : Ліга-Прес, 2002. – 475 с.
2. Датчики : справочное пособие / под общ. ред. В. М. Шарапова, Е. С. Полищука. – Москва : Техносфера, 2012. – 624 с.
3. Джексон Р. Г. Новейшие датчики / Джексон Р. Г. – Москва : Техносфера, 2007. – 384 с.
4. Арутюнян В. М. Микроэлектронные технологии-магистральный путь для создания химических твердотельных сенсоров / В. М. Арутюнян // Микроэлектроника. – 1991. – № 4. – С. 337–355.
5. Осадчук О. В. Мікроелектронний оптичний перетворювач концентрації газу / О. В. Осадчук, О. О. Селецька, Л. В. Крилик // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. – Хмельницький, 2018. – Том 2. № 6 (267). – С. 121–125.
6. Осадчук О. В. Радіовимірювальний перетворювач концентрації газу на транзисторній структурі з від'ємним опором / О. В. Осадчук, В. С. Осадчук, Я. О. Осадчук // Матеріали МНТК "Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання". м. Івано-Франківськ, 15-20 травня 2017 р. – С. 12–15.
7. Осадчук В. С. Дослідження газових напівпровідникових елементів на основі полікристалічних плівок оксиду / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, М. О. Прокопова, С. В. Осинський // Оптикоелектронні інформаційні-енергетичні технології. – 2003. – № 5. – С. 108–113.
8. Осадчук В. С. Частотний перетворювач газу на основі двох біполярних транзисторів з активним індуктивним елементом / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, М. О. Прокопова // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2005. – № 2. – С. 86–90.
9. Heiland G. Zum Einfluss von adsorbierten Sauerstoff auf dielektrische Leitfähigkeit von Zinkoxidkristallen / Heiland G. – Berlin : Z. phys., 1954. – 459 p.
10. Schaumburg H. Sensoren / Schaumburg H. – Stuttgart : B.G. Teubner, 1992. – 517 p.
11. Березин А. С. Технология и конструирование интегральных микросхем / Березин А. С., Мочалкина О. Р. – М. : Радио и связь, 1992. – 320 с.
12. Шалимова К. В. Физика полупроводников / Шалимова К. В. – М. : Энергия, 1985. – 392 с.
13. Бонч-Бруевич В. Л. Физика полупроводников / Бонч-Бруевич В. Л., Калашников С. Г. – М. : Наука, 1990. – 688 с.
14. Ржанов А. В. Электронные процессы на поверхности полупроводников / Ржанов А. В. – М. : Наука, 1971. – 480 с.

References

1. Mikroelektronni sensory fizychnykh velychyn / za red. Z. Yu. Hotry. – Lviv : Liha-Pris, 2002. – 475 s.
2. Datchiki : spravocnoe posobie / pod obshh. red. V. M. Sharapova, E. S. Polishhuka. – Moskva : Tehnosfera, 2012. – 624 s.
3. Dzhekson R. G. Novejshie datchiki / Dzhekson R. G. – Moskva : Tehnosfera, 2007. – 384 s.
4. Arutjunjan V. M. Mikrojelektronnye tehnologii-magistral'nyj put' dlja sozdaniya himicheskikh tverdotel'nyh sensorov / V. M. Arutjunjan // Mikrojelektronika. – 1991. – № 4. – С. 337–355.
5. Osadchuk O. V. Mikroelektronnyi optychnyi peretvoriuvach konsentratsii hazu / O. V. Osadchuk, O. O. Seletska, L. V. Krylyk // Herald of Khmelnytskyi National University. – Khmelnytskyi, 2018. – Tom 2. № 6 (267). – С. 121–125.
6. Osadchuk O. V. Radiovymiriuvalni peretvoriuvach konsentratsii hazu na tranzystornii strukturi z vidiemnym oporom / O. V. Osadchuk, V. S. Osadchuk, Ya. O. Osadchuk // Materialy MNTK "Informatsiini tekhnologii ta kompiuterne modeliuвання". m. Ivano-Frankivsk, 15-20 travnia 2017 r. – S. 12–15.
7. Osadchuk V. S. Doslidzhennia hazovykh napivprovodnykovykh elementiv na osnovi polikrystalichnykh plivok oksydu / V. S. Osadchuk, O. V. Osadchuk, M. O. Prokopova, S. V. Osynskyi // Optoelektronni informatsiini-energetychni tekhnologii. – 2003. – № 5. – S. 108–113.
8. Osadchuk V. S. Chastotnyi peretvoriuvach hazu na osnovi dvokh bipoliarnykh tranzystoriv z aktyvnym induktyvnym elementom / V. S. Osadchuk, O. V. Osadchuk, M. O. Prokopova // Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu. – 2005. – № 2. – S. 86–90.
9. Heiland G. Zum Einfluss von adsorbierten Sauerstoff auf dielektrische Leitfähigkeit von Zinkoxidkristallen / Heiland G. – Berlin : Z. phys., 1954. – 459 p.
10. Schaumburg H. Sensoren / Schaumburg H. – Stuttgart : B.G. Teubner, 1992. – 517 p.
11. Berezin A. S. Tehnologija i konstruirovane integral'nyh mikroshem / Berezin A. S., Mochalkina O. R. – М. : Radio i svjaz', 1992. – 320 s.
12. Shalimova K. V. Fizika poluprovodnikov / Shalimova K. V. – М. : Jenergija, 1985. – 392 s.
13. Bonch-Bruevich V. L. Fizika poluprovodnikov / Bonch-Bruevich V. L., Kalashnikov S. G. – М. : Nauka, 1990. – 688 s.
14. Rzhanov A. V. Jelektronnye processy na poverhnosti poluprovodnikov / Rzhanov A. V. – М. : Nauka, 1971. – 480 s.

Рецензія/Peer review : 12.3.2019 р.

Надрукована/Printed : 10.4.2019 р.

Рецензент: д. т. н., проф. Кучерук В. Ю.

М. В. ВАСИЛЬКІВСЬКИЙ, А. Ю. ВОЛОВИК, Р. П. ПАЛАМАРЧУК
Вінницький національний технічний університет

МЕТОД ОЦІНЮВАННЯ ДЖИТЕРУ В ЦИФРОВИХ РАДІОПРИЙМАЛЬНИХ ПРИСТРОЯХ

Виконано обґрунтований аналіз співвідношень для розрахунку рівня шумів та паразитних спектральних складових, що виникають через вплив джитеру тактових сигналів в аналого-цифрових та цифро-аналогових перетворювачах пристроїв первинного цифрового оброблення радіосигналів. Отримано прості аналітичні співвідношення для оцінювання середньоквадратичного значення шуму і амплітуди паразитних спектральних складових на виході АЦП для типових випадків взаємодії сигналу та джитеру.

Ключові слова: аналого-цифрове перетворення, цифро-аналогове перетворення, джитер.

M. V. VASYLKIVSKYI, A. YU. VOLOVIK, R. P. PALAMARCHUK
Vinnytsia National Technical University

METHOD OF JITTER EVALUATIONS IN DIGITAL RADIO RECEIVERS

A substantiated analysis of correlations for calculating the noise level and parasitic spectral components that arise due to the influence of clock jitter in analogue-digital and digital-to-analogue converters of primary digital processing of radio signals is performed. The current level of development of the element base of antilog-to-digital converters during the implementation of algorithms for digital signal processing in radio receivers allows to increase the signal-to-noise ratio by simply increasing the bit of hardware and software. At the same time, the errors made by the ADC can not be adjusted with the help of secondary processing in radio receivers, and the improvement of the characteristics of these nodes is not quite an easy task. The influence of random phase shivering of clock signals (jitter) on the work of ADCs in radio receivers with the harmonic input signal is investigated. In particular, with the help of computer simulation, quantitative estimates of the influence of a harmonic jitter on the processing of the harmonic input signal in digital line link are obtained. The features of the operation of high-speed wide-range ADCs in the input line of radio receivers are examined on the basis of experimental studies for some individual cases. The method of estimating jitter in radio receiver devices for various cases of interaction of a signal and a jitter is offered. For the general case of signal interaction and jitter, the method of estimating the effects arising from the condition of the linearity of the main component of the error on both functions may consist in decomposition of functions on the elementary additive components and the evaluation of the effects for each component. Simple analytical relations were obtained for estimating the mean square noise and amplitude of parasitic spectral components at the output of the ADC for typical cases of signal and jitter interaction.

Keywords: analogue-digital transformation, digital-analogue conversion, jitter.

Вступ

Аналого-цифрові перетворювачі (АЦП) є невід'ємною частиною цифрових радіоприймальних пристроїв (РПП). Тому вони визначають функціональні характеристики радіотехнічної системи, до складу якої входять цифрові РПП [1]. Сучасний рівень розвитку елементної бази АЦП при реалізації алгоритмів цифрового оброблення сигналів (ЦОС) в РПП дозволяє підвищувати відношення сигнал/шум за рахунок простого збільшення розрядності апаратного та програмного забезпечення [2]. При цьому, внесені похибки АЦП не можливо коригувати за допомогою вторинного оброблення в РПП, а покращення характеристик цих вузлів є досить не простою задачею [3].

Вплив випадкового фазового дрижання тактових сигналів (джитеру) на роботу АЦП в РПП при гармонічному вхідному сигналі досліджено в роботах [4, 5]. Зокрема, в роботі [4] за допомогою комп'ютерного моделювання отримано кількісні оцінки впливу гармонічного джитеру на оброблення гармонічного вхідного сигналу в цифрових телекомунікаційних трактах передачі. Особливості функціонування швидкодіяних широкодіапазонних АЦП у вхідних трактах РПП розглянуто лише на основі експериментальних досліджень для деяких окремих випадків [5].

Метою роботи є підвищення точності оцінювання джитеру, що виникає в аналого-цифрових трактах сучасних РПП.

Аналіз впливу джитеру на характеристики АЦП цифрових РПП

Розглянемо сутність проблеми, що виникає в ході реалізації блоків перетворення сигналів в РПП на прикладі найбільш поширеної архітектури АЦП з пристроєм вибірки та зберігання. Для цього, на вхід АЦП подаємо сигнал $x(t)$. Після цього, по фронту тактового сигналу з частотою дискретизації F_s в перетворювачі фіксуються вибірки вхідного сигналу $x_k = x(t_k)$, $k = -\infty, \dots, -1, 0, 1, 2, \dots, \infty$, які в подальшому перетворюються в цифровий код. При ідеальних умовах моменти здійснення вибірок знаходяться один від одного на фіксованому часовому інтервалі $T_s = 1/F_s$, де T_s – інтервал між вибірками, і $t_k = kT_s$, $k = -\infty, \dots, -1, 0, 1, 2, \dots, \infty$. Але, на практиці, відстань між вибірками відрізняється від ідеального значення на величину τ_k , що спричиняє виникнення помилки Δx_k в значенні вибірки, $k = -\infty, \dots, -1, 0, 1, 2, \dots, \infty$. Діапазон допустимого зміщення фронту тактових імпульсів для широкодіапазонних швидкодіяних АЦП відповідає фемтосекундним значенням [7]. Також, необхідно

враховувати випадкове зміщення фронтів зі середньоквадратичним значенням до декількох пікосекунд при проходженні ідеального тактового сигналу через звичайний логічний елемент РПП [8]. Вказані фактори ускладнюють реалізацію цифрових РПП.

Зміну величини τ_k у вибірках сигналів блоку перетворення називають джитером або фазовим дрижанням. Цей параметр може складатися з випадкової та регулярної складових. При надходженні на вхід АЦП сигналу $x(t)$ та відсутності впливу джитеру вихідні вибірки такого сигналу можна відобразити у рівновіддалені моменти часу:

$$t_k = kT_s = \frac{k}{F_s} \quad (k = -\infty, \dots, -1, 0, 1, 2, \dots, \infty),$$

де $T_s = 1/F_s$ – інтервал між вибірками.

При врахуванні впливу джитеру моменти t_k зміщуються:

$$t_k = kT_s + \tau_k,$$

де τ_k – значення джитеру для k -ї вибірки, за якого вихідні вибірки можна визначити за співвідношенням:

$$x_k = x(kT_s + \tau_k), \quad k = -\infty, \dots, -1, 0, 1, \dots, \infty. \quad (1)$$

При мінімальному значенні джитеру, яке залежить від характеру функції $x(t)$ вираз (1) можна розкласти в ряд Тейлора по параметру τ_k :

$$x_k = x(kT_s) + x'(kT_s)\tau_k + 0,5x''(kT_s)\tau_k^2. \quad (2)$$

Перший доданок в формулі (2) дає точне значення вибірки сигналу. Другий доданок визначає основну складову помилки, що зумовлена джитером:

$$e_{1k} = x'(kT_s)\tau_k. \quad (3)$$

Розглянемо більш детально вираз (3) для різних варіантів взаємодії сигналу та джитеру. Особливу увагу необхідно звернути на особливості впливу джитеру на основні динамічні параметри АЦП, які визначаються при використанні гармонійного вхідного сигналу, а також необхідно враховувати, що при дискретизації на проміжній частоті вхідний сигнал близький до гармонічного.

Прийmemo, що на вході АЦП присутній синусоїдальний сигнал з круговою частотою $\omega \neq 0$ та амплітудою A :

$$x(t) = A \sin \omega t. \quad (4)$$

Підставивши (4) в (3), отримаємо:

$$e_{1k} = A\omega\tau_k \cos \omega kT_s. \quad (5)$$

У цьому випадку, при виконанні співвідношення $\omega\tau_k \ll 1$ забезпечується швидка збіжність ряду Тейлора (2) і в результаті чого значення джитеру можна вважати мінімальним та оцінювати основні паразитні ефекти за формулою (5).

Прийнявши значення джитеру τ_k за випадкову величину з нульовим математичним очікуванням та середньоквадратичним значенням (СКЗ) σ , можна стверджувати, що спричинені при цьому бітові помилки (5) мають шумовий характер. Шляхом розрахунку усередненої за часом дисперсії випадкової величини (5) можна визначити її СКЗ:

$$N = \frac{1}{\sqrt{2}} A\omega\sigma. \quad (6)$$

Враховуючи, що СКЗ сигналу (4) дорівнює $A/\sqrt{2}$, відношення сигнал/шум q на виході АЦП в лінійному масштабі можна визначити за формулою, аналогічною виразам [1]:

$$q = \frac{1}{\omega\sigma}. \quad (7)$$

Звідси за отриманим значенням q можна визначити необхідне значення σ :

$$\sigma \leq \frac{1}{\omega q}. \quad (8)$$

При мінімальному значенні джитеру вибір максимального значення відношення сигнал/шум на виході АЦП доцільно виконувати шляхом порівняння величини шуму, що зумовлений джитером, з величиною власного шуму АЦП. СКЗ шуму АЦП (6), що зумовлений впливом джитеру, пропорційне

амплітуді вхідного сигналу. Максимальне значення шуму АЦП, що зумовлений джитером при фіксованій частоті, досягається при максимально можливій амплітуді вхідного сигналу для r -розрядного АЦП:

$$A = 2^{r-1} h,$$

де h – крок квантування.

При цьому СКЗ шуму АЦП (6) буде дорівнювати:

$$N = 2^{r-2} \sqrt{2} \cdot h \omega \sigma. \quad (9)$$

Враховуючи, що СКЗ власного шуму АЦП σ_s не залежить від амплітуди вхідного сигналу, в подальших розрахунках його зручно відобразити через значення кроку квантування АЦП:

$$\sigma_s = ch, \quad (10)$$

де c – заданий коефіцієнт.

Прирівнявши (9) та (10), отримаємо формулу для визначення максимально допустимого значення СКЗ джитеру:

$$\sigma = \frac{c}{2^{r-2} \sqrt{2} \omega}. \quad (11)$$

Величину шуму (10) можна оцінювати для трьох типових випадків. Власний шум ідеального АЦП зумовлений лише шумом квантування і тому при $A > 0,5h$ коефіцієнт c у формулі (10) дорівнює $c = 1/\sqrt{12}$ [2]. У другому випадку для зручності оцінювання прийемо $c = 1$. При перетворенні вхідного сигналу з частотою 50 МГц за допомогою 16-розрядного АЦП, СКЗ джитеру, згідно з формулою (11) для першого випадку буде дорівнювати 40 фс, а для другого - 137 фс.

Величина власного шуму реального АЦП вказується в паспортних даних ІМС, зокрема для одного з режимів роботи 16-розрядного АЦП LTC2208 при частоті вхідного сигналу 50 МГц відношення сигнал/шум становить $q_s \approx 75$ дБ, що відповідає величині $c = 4,12$ [8]. При цьому, за формулою (11) значення джитеру буде дорівнювати $\sigma = 566$ фс.

Прийнявши до уваги, що в переважній більшості РПП при подальшій обробці сигналів використовується цифровий смуговий фільтр, який додатково обмежує смугу робочих частот до величини B , тому СКЗ шуму після фільтра знижується пропорційно кореню квадратному із значення смуги. В результаті, замість (6) після фільтра отримаємо:

$$N_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} A \omega \sigma \sqrt{\frac{B}{F_s}}. \quad (12)$$

При цьому, значення смуги робочих частот тракту АЦП B будуть дорівнювати сумі смуг пропускання фільтра. У зв'язку з цим, замість СКЗ для розрахунків зручніше використовувати спектральну щільність потужності шуму, що не залежить від робочої смуги. З (6) випливає, що середня потужність розглянутого шумового сигналу дорівнює

$$P_n = 0,5 (A \omega \sigma)^2.$$

Враховавши, що ця потужність для білого шуму розподілена рівномірно в діапазоні частот шириною $F_s = 1/T_s$, спектральну щільність потужності можна визначити за виразом $G = 0,5 (A \omega \sigma)^2 T_s$.

Нормуючи цей вираз до середньої потужності сигналу $P_{sig} = 0,5 A^2$, отримуємо відношення спектральної щільності потужності шуму до потужності сигналу:

$$R = \omega^2 T_s \sigma^2.$$

Це відношення зазвичай розраховується в децибелах:

$$R_{дБ} = 10 \log(\omega^2 T_s \sigma^2). \quad (13)$$

Спектральна щільність шуму (13) знижується на 6 дБ при зниженні величини джитеру в 2 рази або при зниженні частоти сигналу в 2 рази, а також знижується на 3 дБ при збільшенні частоти дискретизації удвічі. Наприклад, для параметрів $F_s = 100$ МГц, $\sigma = 1$ пс при частоті сигналу 50 МГц, отримуємо $R_{дБ} \approx -150$ дБн/Гц. При шумовій смузі 10 МГц ця величина дає відношення сигнал / шум 80 дБ.

Вплив випадкового джитеру на сигнал несучої частоти

У цифрових РПП широкого поширення набувають схеми дискретизації сигналу на проміжній частоті, що мають ряд переваг порівняно зі схемами дискретизації на відеочастоті. При цьому ширина спектра сигналу набагато менша проміжної частоти, тому сигнал можна представити у вигляді:

$$x(t) = a(t) \sin[\omega_0 t + \phi + \psi(t)], \quad (14)$$

де $a(t)$ – функція амплітудної модуляції;
 $\psi(t)$ – функція фазової модуляції сигналу;
 ω_0 – носійна частота;
 ϕ – випадкова початкова фаза.

Будемо вважати, що щільність розподілу фази ϕ є рівномірною на відрізку $[0, 2\pi]$. Особливістю сигналу (14) є те, що швидкість зміни модулюючих функцій істотно менше, ніж носійної.

Для оцінки помилки, обумовленої джитером, підставимо вираз (14) в (3):

$$e_{1k} = \tau_k \left\{ a(kT_s) \cos[\omega_0 kT_s + \phi + \psi(kT_s)] [\omega_0 + \psi'(kT_s)] + a'(kT_s) \sin[\omega_0 kT_s + \phi + \psi(kT_s)] \right\} \quad (14)$$

Швидкість зміни функції $\psi(t)$ істотно менша носійної, тому $\psi'(kT_s) \ll \omega_0$, і доданок $\psi'(kT_s)$ у другій квадратній дужці цієї формули можна опустити:

$$e_{1k} = \tau_k \left\{ a(kT_s) \omega_0 \cos[\omega_0 kT_s + \phi + \psi(kT_s)] + a'(kT_s) \sin[\omega_0 kT_s + \phi + \psi(kT_s)] \right\}.$$

Розглянемо середній квадрат цієї величини. Після нескладних перетворень одержуємо:

$$M[e_{1k}^2] = 0.5\sigma^2 \left\{ \omega_0^2 a^2(kT_s) + [a'(kT_s)]^2 \right\},$$

де $M[\]$ – символ математичного очікування.

Усреднюючи цей вираз по часу (індексу k отримуємо середнє значення для квадрата помилки (15):

$$N_1^2 \approx 0.5\sigma^2 \left(\{CK3[a(kT_s)]\}^2 \omega_0^2 + \{CK3[a'(kT_s)]\}^2 \right).$$

При повільній зміні функції модуляції другий доданок суттєво менше першого:

$$CK3[a(kT_s)] \gg \frac{CK3[a'(kT_s)]}{\omega_0^2},$$

оскільки права частина цієї нерівності є, з точністю до константи, не що інше, як середня зміна величини обвідної за період носійної частоти. Іншими словами, це нерівність може розглядатися як більш точне визначення повільності зміни обвідної. Тому, спрощуючи отриману формулу для середнього квадрата помилки, отримуємо наступну оцінку СКЗ помилки (15):

$$N_1 \approx \frac{1}{\sqrt{2}} CK3[a(t)] \omega_0 \sigma.$$

Цей вираз аналогічний виразу (6) для синусоїдального сигналу. Отже, можна використовувати формули (7)–(13) з урахуванням зазначеної заміни. Таким чином, при використанні дискретизації на проміжній частоті підвищуються вимоги до якості формування тактової частоти, а необхідна величина СКЗ джитеру обернено пропорційна величині проміжної частоти.

Взаємодія синусоїдального джитеру з гармонійним сигналом

Джитер τ_k в (5) є синусоїдальним:

$$\tau_k = \varepsilon \sin \omega_1 kT_s. \quad (16)$$

де ε – амплітуда відхилення за часом моментів вибірок від номінального положення.

При цьому величина помилки (5) дорівнює:

$$e_{1k} = A\omega \sin \omega_1 kT_s \cos \omega kT_s = 0.5A\omega\varepsilon \left[\sin(\omega_1 + \omega)kT_s + \sin(\omega_1 - \omega)kT_s \right]. \quad (17)$$

Відобразивши в цьому виразі синусоїдальні функції у вигляді суми двох експоненційних функцій, отримуємо:

$$e_{1k} = -0.25jA\omega\varepsilon \left(e^{j(\omega_1 + \omega)kT_s} - e^{j(\omega_1 - \omega)kT_s} + e^{j(\omega_1 - \omega)kT_s} - e^{j(\omega_1 + \omega)kT_s} \right).$$

Таким чином, гармонійний джитер призводить до появи паразитних спектральних складових на частотах $\pm\omega_1 \pm\omega$ з амплітудою $0.25A\omega\varepsilon$. Амплітуда корисної спектральної складової дорівнює $0,5A$, тому відношення Q амплітуди основної гармоніки до амплітуди паразитних спектральних складових (ПСС) становить:

$$Q = \frac{2}{\omega \varepsilon}. \quad (18)$$

Наприклад, для частоти 50 МГц і амплітуди джитеру $\varepsilon = 1$ пс це відношення становить 76,1 дБ. Зауважимо, що за своїм виглядом формула (18) збігається з точністю до співмножника два з формулою (7) для випадкового джитеру.

За заданим відношенням Q можна обчислити необхідне значення амплітуди джитеру:

$$\varepsilon \leq \frac{2}{\omega Q}. \quad (19)$$

Наприклад, для того щоб паразитні спектральні складові мали рівень не більше -80 дБ ($Q = 10^4$) від амплітуди основної гармоніки частоти 50 МГц необхідно, щоб амплітуда джитеру становила не більше 637 фс.

Випадок гармонійного джитеру (16) може служити моделлю системи, в якій тактова частота формується високоякісним кварцовим генератором, що дає синусоїдальний сигнал

$$s(t) = \alpha \sin \omega_s t, \quad (20)$$

де $\omega_s = 2\pi F_s$ – моменти взяття вибірок, які визначаються переходом сигналу (20) через нуль від негативних до позитивних значень: $t_k = kT_s$, k – ціле.

При цьому впливи завад на сигнал (20) зміщують положення нуля і призводять до джитеру моментів вибірок. При синусоїдальному адитивному наведенню гармонійного сигналу з частотою ω_1 , і амплітудою β замість (20) маємо:

$$s(t) = \alpha \sin \omega_s t + \beta \sin \omega_1 t. \quad (21)$$

Оцінимо зміщення положення нуля через додавання другого члена за умови його малого значення ($\beta \ll \alpha$). Нехай нове положення нуля визначається виразом $t_k = kT_s + \tau_k$, де τ_k – зміщення через наведення. Підставляючи цей вираз в (21), маємо:

$$\alpha \sin \omega_s (kT_s + \tau_k) + \beta \sin \omega_1 (kT_s + \tau_k) = 0.$$

Виконуючи з цією формулою елементарні перетворення і відкидаючи члени другого порядку малості, отримуємо рівняння для визначення положення нуля: $\alpha \omega_s \tau_k + \beta \sin \omega_1 kT_s \approx 0$, звідки:

$$\tau_k \approx \frac{\beta}{\alpha} \frac{1}{\omega_s} \sin \omega_1 kT_s.$$

Таким чином, джитер через наведення має синусоїдальний характер виду (16) з амплітудою:

$$\varepsilon = \frac{\beta}{\alpha} \frac{1}{\omega_s}. \quad (22)$$

Підставляючи цей вираз в (19), отримуємо необхідне відношення амплітуди β наведення до амплітуди α тактового сигналу для отримання заданого параметру Q на виході АЦП:

$$\frac{\beta}{\alpha} \leq \frac{2\omega_s}{\omega Q}. \quad (23)$$

Наприклад, для отримання значення $Q = 10^4$ (80 дБ) при параметрах $\omega_s / \omega = 3$, і $\alpha = 1$ В з (23) маємо $\beta = 0.6$ мВ. Подібна мала величина означає, що пристрої формування тактового сигналу повинні бути екрановані від електромагнітних завад, в тому числі і від цифрових сигналів з виходу АЦП.

Формули (17)–(23) відносяться до основної паразитної складової, зумовленої джитером. Розглянемо інші складові в (2). Член ряду Тейлора з номером $n > 0$ має вигляд:

$$p_n(kT_s) = \frac{\tau_k^n}{n!} x^{(n)}(kT_s).$$

Підставляючи в цю формулу вирази для τ_k з (16) і $x(t)$ і (4), маємо:

$$p_n(kT_s) = \begin{cases} A(-1)^m \cos \omega kT_s \frac{(\omega \varepsilon \sin \omega_1 kT_s)^n}{n!} & \text{для непарних } n = 2m + 1, m = 0, 1, \dots, \\ A(-1)^m \sin \omega kT_s \frac{(\omega \varepsilon \sin \omega_1 kT_s)^n}{n!} & \text{для парних } n = 2m, m = 1, 2, \dots, \end{cases} \quad (24)$$

Функцію $\sin^n \omega_1 t$ можна представити у вигляді суми гармонік наступним чином:

$$\sin^n \omega_1 t = \begin{cases} \sum_{k=0}^m a_k \sin(2k+1)\omega_1 t & \text{для непарних } n = 2m+1, m = 0, 1, \dots, \\ \sum_{k=0}^m a_k \cos 2k\omega_1 t & \text{для парних } n = 2m, m = 1, 2, \dots \end{cases} \quad (25)$$

Тоді з виразів (24) та (2) випливає, що в спектрі сигналу будуть присутні всі паразитні спектральні складові з частотою виду $\pm\omega \pm k\omega_1, k = 0, 1, 2, \dots$. Для прикладу на рис. 1 показаний спектр вихідного сигналу за умови впливу гармонійного джитеру, що отриманий за допомогою моделювання.

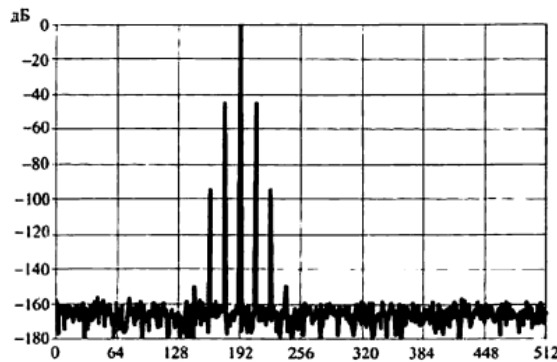


Рис. 1. Спектр синусоїдального сигналу при гармонійному джитері

З рисунку наочно видно наявність розглянутих вище паразитних спектральних складових. Їх рівень швидко падає зі збільшенням порядку гармоніки, проте в системах з великим динамічним діапазоном можуть бути суттєвими не лише перші, але і наступні паразитні спектральні складові. Рівень перших ПСС збігається з теоретичною оцінкою (18) з точністю до тисячних часток децибела.

Вплив синусоїдального джитеру на складний сигнал

Аналогічні ефекти спостерігаються і в разі сигналу довільного виду. Розглянемо основну паразитну складову (3). Уявімо функцію $x(t)$ на розглянутому інтервалі, що містить L відліків, у вигляді ряду Фур'є:

$$x(t) = \sum_{in} c_n e^{jn\omega_0 t}, \quad (26)$$

де $\omega_0 = 2\pi L / F_s$.

Підставляючи (26) та (16) в (3), отримуємо вираз для основної складової помилки e_{I_k} . Звідси випливає, що паразитна складова у вихідному сигналі має складові, що отримуються зсувом спектра вхідного сигналу на $+\omega_1$ і $-\omega_1$ з одночасним масштабуванням спектральних складових множителем n . Зазначене положення ілюструється рис. 2, де наведено спектр імпульсу з лінійною частотною модуляцією (ЛЧМ).

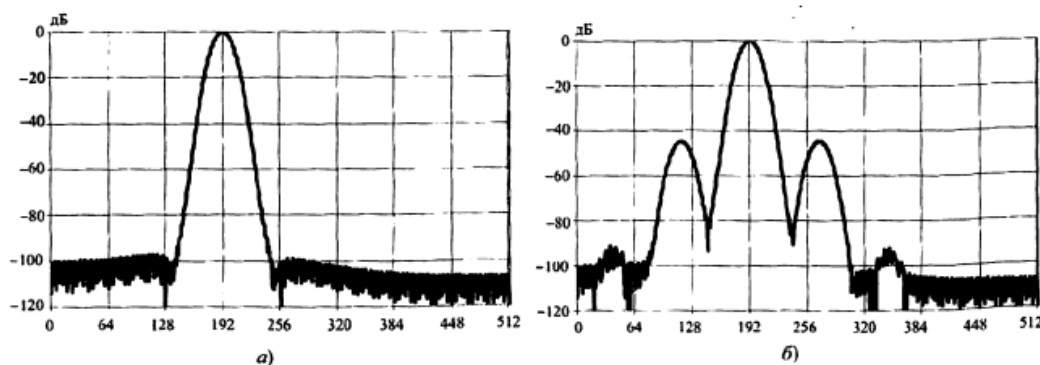


Рис. 2. Спектр ЛМЧ-імпульсу: а) – без джитеру; б) – з синусоїдальним джитером

За відсутності джитеру спектр має вигляд однієї пелюстки. При наявності джитеру виникають паразитні пелюстки, обумовлені розглянутим вище зсувом вліво і вправо неспотвореного спектра на величину частоти джитеру. Добре помітні і паразитні складові такого порядку, що визначаються наступними членами ряду Тейлора в (2) і викликані зсувом спектра на подвоєну величину частоти джитеру. Відзначимо, що рівень основних паразитних пелюсток описується формулою (18) з точністю до сотих часток децибела.

Висновки

Запропоновано метод оцінювання джитеру в РПП для різних випадків взаємодії сигналу і джитеру. Якщо, джитер є сумою двох гармонійних складових з частотами ω_1 , ω_2 , то неважко бачити, що основна складова помилки (3) буде містити гармоніки з частотами $\pm\omega \pm \omega_1$, $\pm\omega \pm \omega_2$. Якщо враховувати інші компоненти, то вони будуть містити складові з частотами виду $\pm\omega \pm m_1\omega_1 \pm m_2\omega_2$, $m_1, m_2 = 0, 1, 2, \dots$

Для загального випадку взаємодії сигналу та джитеру методика оцінки ефектів, що виникають за умови лінійності основної складової помилки (3) по обом функціям може полягати в розкладанні функцій на елементарні адитивні складові та оцінки ефектів для кожної складової.

Отримано прості аналітичні співвідношення для оцінювання середньоквадратичного значення шуму і амплітуди паразитних спектральних складових на виході АЦП для типових випадків взаємодії сигналу та джитеру.

Література

1. Бортник Г.Г. Методи та засоби обробки високочастотних сигналів / Г.Г. Бортник, В.М. Кичак. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1998. – 132 с.
2. Айфичер Э. Цифровая обработка сигналов / Э. Айфичер, Б. Джервис ; пер. с англ. – М. : Вильямс, 2004. – 992 с.
3. Бортник Г.Г. Методи та засоби аналого-цифрового перетворення високочастотних сигналів / Г.Г. Бортник, С.Г. Бортник, В.М. Кичак. – Вінниця : ВНТУ, 2014. – 128 с.
4. Бортник Г.Г. Швидкодіючий аналого-цифровий перетворювач підвищеної точності / Г.Г. Бортник // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2002. – № 5. – С. 47–50.
5. Бортник Г.Г. Аналіз ефективності аналого-цифрового перетворення сигналів у радіотехнічних комплексах / Г.Г. Бортник, М.Л. Мінов, О.В. Стальченко // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2011. – № 2. – С. 12–15.
6. 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.
7. Бортник Г.Г. Метод аналого-цифрового перетворення високочастотних сигналів з додатковим шумоподібним сигналом / Г.Г. Бортник, О.В. Стальченко, К.О. Боярський // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2015. – № 1. – С. 100–105.
8. Кестер У. Аналого-цифровое преобразование / Уолт Кестер ; пер. с англ. – М. : Техносфера, 2007. – 1016 с.

References

1. Bortnyk H.H. Metody ta zasoby obrobky vysokochastotnykh syhnaliv / H.H. Bortnyk, V.M. Kychak. – Vinnytsia : UNIVERSUM-Vinnytsia, 1998. – 132 s.
2. Aifycher Э. Tsyfrovaia obrabotka syhnalov / Э. Aifycher, B. Dzhevys ; per. s anhl. – M. : Vyliams, 2004. – 992 s.
3. 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.
4. Bortnyk H.H. Shvydkodiuchy analoho-tsyfrovyy peretvoriuvach pidvyschenoi tochnosti / H.H. Bortnyk // Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu. – 2002. – № 5. – S. 47–50.
5. Bortnyk H.H. Analiz efektyvnosti analoho-tsyfrovoho peretvorennia syhnaliv u radiotekhnichnykh kompleksakh / H.H. Bortnyk, M.L. Minov, O.V. Stalchenko // Informatsiini tekhnolohii ta kompiuterna inzheneriia. – 2011. – № 2. – S. 12–15.
6. Bortnyk H.H. Metod otsiniuvannia determinovanykh skladovykh fazovoho dryzhannia u tsyfrovyykh systemakh peredavannia / H.H. Bortnyk, M.V. Vasykivskiy, O.H. Bortnyk // Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh. – 2012. – № 3. – S. 45–48.
7. Bortnyk H.H. Metod analoho-tsyfrovoho peretvorennia vysokochastotnykh syhnaliv z dodatkovym shumopodibnym syhnalom / H.H. Bortnyk, O.V. Stalchenko, K.O. Boiarskyi // Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh. – 2015. – № 1. – S. 100–105.
8. Kester U. Analoho-tsyfrovoe preobrazovanye / Uolt Kester ; per. s anhl. – M. : Tekhnosfera, 2007. – 1016 s.

Рецензія/Peer review : 18.2.2019 р.

Надрукована/Printed : 10.4.2019 р.
Рецензент: к. т. н., проф. Бортник Г. Г.

В. П. МАРЦЕНЮК

Університет в Бельско-Бялій, Польща

А. С. СВЕРСТЮК, О. А. БАГРІЙ-ЗАЯЦЬ

Тернопільський державний медичний університет імені І.Я. Горбачевського, Україна

Н. В. КОЗОДІЙ

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ БІОСЕНСОРІВ ТА ІМУНОСЕНСОРІВ

В роботі проведено огляд математичних моделей біосенсорів та імуносенсорів. Наведено класифікацію досліджуваних пристроїв відносно фізичних перетворювачів. Розглянуто статичну модель біосенсора на основі поверхневого плазмонного резонансу. Представлено оптичні моделі біосенсора на основі призми та з використанням світловода. Описано принцип вимірювання в біосенсорах на основі явища поверхневого плазмонного резонансу. Проаналізовано статичну математичну модель оцінювання терміну експлуатації біосенсорів. Розглянуто статичну модель біосенсора з багатошаровою структурою. Запропонована математична модель для визначення втрати експлуатаційних характеристик біосенсора може застосовуватися для різних ферментних біосенсорів. Зроблено висновок, що електрохімічні біосенсори з віком за підвищених температур швидше втрачають свої експлуатаційні характеристики. Розглянуто біосенсор для експрес-вимірювання концентрації глюкози з можливістю контролю якості продуктів харчування та в медицині. Запропоновано динамічну модель імуносенсора, яка ґрунтується на системі решітчастих диференціальних рівнянь із запізненням, яка враховує наявність колоній антигенів та антитіл, що локалізовані у пікселях, а також дифузю колоній антигенів між пікселями. Введено клас решітчастих різницевих рівнянь із запізненням в часі для моделювання взаємодії "антиген-антитіло" в пікселях імуносенсора. Модель ґрунтується на низці біологічних припущень щодо взаємодії колоній антигенів та антитіл, а також дифузії антигенів. Для опису дискретних у просторі колоній, локалізованих у відповідних пікселях, використано апарат диференціальних рівнянь на прямокутній решітці. Розглянуті в роботі моделі біосенсорів та імуносенсорів можуть бути використані для проектування імуносенсорних пристроїв з можливістю контролю параметрів, які б забезпечували їх операційну стійкість.

Ключові слова: біосенсор, імуносенсор, математична модель, статична математична модель, диференціальні рівняння.

V. P. MARTSENYUK

University in Belsko Biala, Poland

A. S. SVERSTIUK, O. A. BAGRII-ZAYATS

Ternopil State Medical University named after I.Ya. Gorbachevsky

N.V. KOZODII

Ivan Pul'uj Ternopil National Technical University

MATHEMATICAL MODELS OF BIOSENSORS AND IMMUNOSENSORS

An overview of mathematical models of biosensors and immunosensors was carried out. The classification of investigated devices, in relation to physical converters, is given. The static model of the biosensor based on the surface plasmon resonance is considered. Optical models of biosensors operating on the basis of prisms and fiber optics are presented. The principle of biosensors measurement on the basis of the phenomenon of surface plasmon resonance is described. The static mathematical model of evaluation of the lifetime of biosensors is analysed. The static model of biosensor with multilayered structure is considered. The mathematical model for determining the loss of performance characteristics of the biosensor, can be used for various enzyme biosensors, is proposed. It is concluded that electrochemical biosensors, with age at elevated temperatures, lose their operational characteristics more quickly. A biosensor for measuring glucose concentration with the ability to control food quality and medicine is considered. A dynamical model of an immunosensor based on a system of delay lattice differential equations that takes into account the presence of colonies of antigens and antibodies localized in pixels, as well as the diffusion of antigen colonies between pixels, is proposed. A class of solvable difference equations with delay in time for modelling the "antigen-antibody" interaction in an immunosensor was introduced. The model is based on a number of biological assumptions about the interaction of colonies of antigens and antibodies, as well as the diffusion of antigens. To describe discrete spaces in the space of colonies localized in corresponding pixels, the apparatus of differential equations on a rectangular solution is used. The models of biosensors and immunosensors, which can be used to design immunosensory devices with the ability to control parameters that would ensure their operational stability, are considered in this work.

Key words: biosensor, immunosensor, mathematical model, static mathematical model, differential equations.

Вступ. Вирішенням багатьох завдань, що постають перед людством в третьому тисячолітті, є невідпинний науковий прогрес в найбільш важливих напрямках розвитку та збереження земної цивілізації. Людство повсякчас відкриває для себе нові можливості, але також зустрічається і з новими викликами, серед яких вирізняються проблеми в боротьбі з новими видами захворювань, в збереженні довкілля та в протистоянні терористичним загрозам. В цьому розумінні значний науковий та практичний інтерес становлять дослідження в біосенсоріці. Серед сучасних наукових методик особливе місце займають біосенсори, що пропонують величезний потенціал для виявлення широкого спектру аналітів у медичній галузі, харчовій промисловості, моніторингу навколишнього середовища, безпеці та обороні.

Біосенсор – це компактний аналітичний пристрій, що містить біологічно чутливий елемент,

інтегрований у фізико-хімічний перетворювач, метою якого є отримання оптичних або електронних сигналів, що відповідають концентрації аналізованої проби. Вплив на суспільство внаслідок наявності таких систем є величезним, тому вивчення будь-якої стратегії, яка могла б скоротити час розробки й витрат, та розкрити альтернативні конструкції, є надзвичайно важливим. Зокрема, математичне моделювання є потужним інструментом для наукового аналізу і прогнозування.

Серед великого сімейства біосенсорів імуносенсори є типовими сенсорами, що містять шар рецептора, який чутливий і селективний, включаючи іміобілізований біологічний елемент, наприклад антитіло, антиген або хаптен, які є імунологічними рецепторами для молекул, які досліджуються. В імуносорі (імуносенсорі) відбувається реакція, яка ґрунтується на взаємодії між антитілом і антигеном або маленькими молекулами (хаптенами). Антитіла часто називаються імуноглобулінами, тому що вони є протеїнами, які пов'язані з імунною системою.

Імуноглобуліни використовуються імунною системою для ідентифікації та нейтралізації чужорідних об'єктів. Вони використовують властивості зв'язування антигенів. Антигени і антитіла, можуть використовуватися в шарі рецептора в біосенсорах. Зменшення властивостей, які пов'язані з антитілами під час процесу імуобілізації антигену, використовуються в конструкції шару рецептора, де антитіла в відіграють функцію аналітів (молекул предметного детектування).

Мета дослідження. Огляд математичних моделей біосенсорів та імуносенсорів шляхом виявлення аналітичних та чисельних методів, що застосовуються при вивченні електрохімічних та оптичних біосенсорів з метою оптимізації процесу моделювання.

Аналіз останніх досліджень. Останнім часом велика увага дослідників привернута до питань розробки та використання біосенсорів та імуносенсорів [1–10]. У роботі [5] наведено ґрунтовний огляд теоретичних основ проектування біосенсорів. Прикладні аспекти використання імуносенсорів обговорюються в [9].

У [11] сформульовано основні задачі, пов'язані з дослідженням стійкості в біосенсорах. У роботах [1, 12, 13] йдеться про проектування сенсорів, в основу роботи яких покладено перебіг хімічних реакцій. Для такого роду сенсорів використовується математичне моделювання в класі решітчастих диференціальних рівнянь. У даній роботі такий підхід буде використано для імуносенсорів. В [14] викладено основні результати щодо використання популяційної динаміки в якості моделі імунної системи за допомогою диференціальних рівнянь із запізненням, яка буде використана в даній роботі.

Основні компоненти біосенсорів та імуносенсорів базуються на добре зрозумілих фізичних процесах (таких як дифузія, конвективний потік, енергія та масообмін), а також на основі хімічних та біологічних реакцій, які піддаються математичному моделюванню з використанням звичайних диференціальних рівнянь та диференціальних рівнянь в частинних похідних.

За типом фізичного перетворювача сенсори можуть бути поділені на основні групи [15]: 1) електрохімічні, 2) масо-чутливі, 3) калориметричні, 4) акустичні, 5) оптичні. Тип перетворювача, що використовується, визначається особливістю реакцій і перетворень у хімічному чи біологічному чутливому шарі.

Оптичні сенсори мають ряд переваг перед електрохімічними та механічними методами. Основною їх перевагою є висока швидкість, точність вимірювання параметрів аналіту, висока чутливість та широкий діапазон застосування [16]. Недоліком є висока вартість вимірювального обладнання. Найбільш широко використовувані оптичні методи: абсорбція, флуоресценція, хемілюмінесценція та поверхневий плазмонний резонанс (ППР).

1. Статичні моделі біосенсорів.

1.1. Статична модель біосенсора на основі поверхневого плазмонного резонансу.

Метод вимірювання на основі ППР є найбільш ефективним, оскільки не потребує використання міток та видає результат в реальному часі [17]. ППР – це явище порушення умови повного внутрішнього відбиття (ПВВ) на межі поділу двох середовищ: більш оптично щільного та менш оптично щільного. Під час виникнення ППР значна частина енергії падаючого світла на поверхню металевої плівки чутливого елементу ППР-сенсору перетворюється в енергію плазмонів, внаслідок чого інтенсивність відбитого від її поверхні світла різко спадає. При цьому електричне поле цієї хвилі спадає за експонентою у напрямку, який перпендикулярний межі поділу.

Подібно до більшості різноманітних сенсорів, біосенсори складаються з власне чутливого біологічного чи хімічного елементу, або первинного перетворювача, та сполученого з ним фізичного перетворювача. Останній призначений для формування вихідного сигналу, який відображає реакцію чутливого елемента на присутність відповідного аналіту. Аналітичні системи, які використовують явище ППР для реалізації функції такого перетворювача, знайшли в останній час широке застосування під час дослідження високоспецифічних біомолекулярних реакцій («біорозпізнавання»), до яких належать реакції антиген-антитіло, фермент-субстрат, рецептор-ліганд (роль ліганда можуть відігравати молекули гормонів, нейромедіаторів, ферментів), а також взаємодії молекул фармакологічних препаратів або токсинів з відповідними мішенями

У роботі [18] описано ефект додавання графенових шарів у призмі та планарних хвиль на основі поверхневих плазмонних резонансних біосенсорів, використовуючи режим кутового сканування. Запропоновані сенсори розроблені на базі графенового матеріалу для біомолекулярного розпізнавання

елементів. Від лазера з довжиною хвилі 633 нм отримуємо монохроматичне електромагнітне випромінювання, що взаємодіє з речовиною, а результати взаємодії зберігаються на спектрофотометрі і комп'ютері. Було враховано, що для призми біосенсора на основі ППП світло із потужністю P попадало на одну нахилену поверхню призми і відбивалося від іншої нахиленої поверхні, як показано на рис. 1.



Рис. 1. Модель біосенсора на основі призми

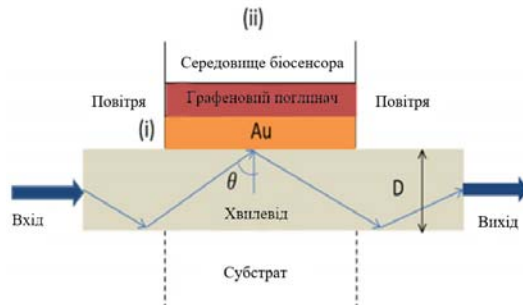


Рис. 2. Модель біосенсора на основі світловода

З іншого боку, таке ж світло проходить через світловод, як показано на рис. 2. Якщо dP – це потужність на одному кінці обох давачів між кутами падіння θ і $\theta + d\theta$, то запишемо співвідношення для P згідно з [19, 20]:

$$dP \propto P(\theta) d\theta, \tag{1}$$

де $P(\theta)$ – модальна потужність, яка пов'язана з кутом падіння може бути записана згідно з [19, 20]:

$$P(\theta) = \frac{n_c^2 \sin \theta \cos \theta}{(1 - n_c^2 \cos^2 \theta)^2} \tag{2}$$

У формулі (2) n_c є показником заломлення. Нормалізована передана потужність, згідно з [19, 20], має вигляд:

$$P_{trans} = \frac{\int_{\theta_{cr}}^{\pi/2} R_p^{N_{ref}(\theta)} P(\theta) d\theta}{\int_{\theta_{cr}}^{\pi/2} P(\theta) d\theta},$$

де R_p – коефіцієнт відбивання, можна знайти, використовуючи чотири шари (ядра або призми / метал / чутливі шари / середовище зондування) для модельного аналізу.

1.2. Температурна модель оцінювання терміну експлуатації біосенсорів

У роботі [21] запропонована модель оцінювання терміну експлуатації біосенсорів з метою застосування ефективних рекомендацій при вивченні стабільності та зручності використання біосенсорів протягом певного терміну експлуатації.

У випадку визначення терміну придатності та багаторазового використання дані часу сигналу, зареєстровані між 90 і 95 секундами, були усереднено для проведення відповідного оцінювання

$$\bar{I}_a = \frac{\sum_{n_0}^{n_1} I_i}{n} \tag{3}$$

де \bar{I}_a – середнє значення сигналу; n_0 та n_1 – часовий діапазон усередненого сигналу між 90 і 95 секундами; I_i – значення сигналу в заданій точці часу; n – кількість вимірювань (5 с при 10 Гц, звідси 50 вимірювань). Оскільки кожне вимірювання повторювалося три рази ($\bar{I}_a, \bar{I}_b, \bar{I}_c$), та їх середнє значення розглядалося як точкове \bar{I} .

$$\bar{I} = \frac{\bar{I}_a + \bar{I}_b + \bar{I}_c}{3} \tag{4}$$

Таким чином, визначали два значення: \bar{I} при 0 мМ і при 1,5 мМ, маркерах $I_{x,0}$ та $I_{x,1,5}$.

$I_{x,1,5}$, що дає один сигнал для одного датчика в один момент часу. Однак, під час перевірки трьох біосенсорів, необхідно розрахувати стандартне відхилення S :

$$S = \sqrt{\frac{\sum (I_i - \bar{I})^2}{N - 1}} \tag{5}$$

де I_i – дискретне вимірювання; \bar{I} – середнє значення вимірювання; N – кількість даних.

Значення сигналу в момент часу $t=0$ вважається стабілізованим біосенсором перед виявленням будь-якого відхилення його параметрів. У випадку продовження використання експерименту старіння, лінійні значення вихідних даних використовуються безпосередньо для подальших розрахунків.

Було досліджено модель оцінювання терміну експлуатації біосенсорів (6) та експериментальну лінійну регресійну модель (7). Використано сигнал від електрохімічного біосенсора в певний момент часу із визначеною температурою, I_0 – початковий сигнал, k_T – коефіцієнт деградації, який залежить від температури (k_T у обох моделях рівняння (6) і (7) не є однаковою), а t – час.

$$\ln I = \ln I_0 - k_T t$$

$$\frac{I}{I_0} = e^{-k_T t} \quad (6)$$

$$\frac{I}{I_0} = k_T t \quad (7)$$

Коефіцієнти апроксимації (R^2) кожного значення для обох регресійних моделей, що порівнюються, вибираються з найвищими значеннями R^2 , для отримання значення k_T . Коефіцієнти деградації згодом накладаються на температури, застосовуючи інший лінійний регресійний аналіз згідно з (8). Це рівняння використовується для розрахунку коефіцієнта деградації для будь-якої дискретної температури в межах застосування моделі.

$$k_T = pT + r, \quad (8)$$

де значення p та r характерні для лінійної регресії температурної залежності коефіцієнта деградації і залежить від біосенсора та умови використання. Підставляючи величину k_T з рівняння (8) в рівняння (7) отримуємо рівняння (9), що в кінцевому рахунку використовується для часу та температури прогнозування сигналу біосенсора.

$$I = I_0 ((pT + r)t) \quad (9)$$

За отриманими результатами зроблено висновок, що електрохімічні біосенсори, з віком при підвищених температурах швидше втрачають свої експлуатаційні характеристики. Біосенсори можуть відрізнятися між собою типами, етикетками та протоколами виготовлення, параметрами, що представлені в попередніх дослідженнях не застосовувалися універсально. Запропонована методологія, процедури та моделі для визначення втрати експлуатаційних характеристик біосенсора з врахуванням розглянутої моделі може застосовуватися для різних ферментних біосенсорів.

1.3. Статичні моделі біосенсорів з багатошаровою структурою.

У роботі [22] розглянуто біосенсор для експрес-вимірювання концентрації глюкози. Використання даного методу є дуже важливим для контролю якості продуктів харчування та медицині. Продуктивність біосенсора глюкози базується на класичному ферментативному каталізі реакції окислення глюкози, що виробляє глюконову кислоту (AH), і в кінцевому результаті змінює концентрацію протонної речовини в біосенсорній мембрані. Біосенсор складається з двох частин: (1) твердотілого перетворювача, який лінійно перетворює концентрацію протонів поблизу інтерфейсу мембрано-датчика x_3 в електричний сигнал; (2) багатошарової (трьохшарова в моделі) мембрани, причому кожен шар рівномірно розподіляє фермент і заряджені інкапсульовані молекули із заданими концентраціями. Припускається, що тестовий розчин містить п'ять складових: глюкозу (G), кисень (O), протони (H), буфер (WH) та його кон'югативної бази (W) з концентраціями C_G, C_O, C_H, C_{WH} та C_W , відповідно.

Перехідні розподіли електростатичного потенціалу та концентрації у всій мембрані можна описати наступною системою частинних диференціальних рівнянь:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) = -\frac{4\pi}{\varepsilon_0} \sum_S e z_S C_S + Q \quad (10)$$

$$\frac{\partial C_S}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} J_S - U_S, \quad (11)$$

де $J_S = C_S \frac{e z_S D_S}{kT} \frac{\partial \phi}{\partial x} - D_S \frac{\partial C_S}{\partial x}$;

$$\varepsilon, Q, D_S = \begin{cases} \varepsilon_1, Q_1, D_S^1, & x \in [0, x_1]; \\ \varepsilon_2, Q_2, D_S^2, & x \in (x_1, x_2); \\ \varepsilon_3, Q_3, D_S^3, & x \in (x_2, x_3]. \end{cases}$$

У вищенаведених формулах e є заряд протонів; ϕ – електростатичний потенціал; k – константа Больцмана, ε_0 , ε абсолютна та відносна діелектричні константи; Q – щільність інкапсульованих зарядів в

шарі; J_S, D_S, C_S, z_S є флюс, коефіцієнт дифузії, концентрація і заряд (в одиницях e) різних видів (для $s = G, O, WH$; $z_S = 0$; $z_H = +1$; $z_W = -1$); U_S – покоління-рекомбінацією швидкості видів; T – абсолютна температура. У моделі припускається, що для швидкості ферментативної реакції окислення глюкози виконується співвідношення кінетики Міхаеліса-Ментена і є незалежними від концентрації протона C_H :

$$U_G = 2U_0 = V_{\max} \frac{C_G C_0}{K_G^M C_0 + K_0^M C_G + C_G C_0}, \quad (12)$$

де K_S^M ($s = G, O$) є константою Міхаеліса; V_{\max} є максимальна швидкість ферментативної реакції.

Проте концентрація протонів також впливає за допомогою процесів асоціації-дисоціації із з'єднаною основою буфера W . Відповідні швидкості реакції U_H, U_W і U_{WH} можна записати наступним чином:

$$\begin{aligned} U_H &= -U_G - k_b (K_W C_{WH} - C_W C_H), \\ U_W &= -U_{WH} = -k_b (K_W C_{WH} - C_W C_H), \end{aligned} \quad (13)$$

де K_W – константа реакції, k_b – зв'язування швидкості видів W і H .

Для інтерфейсів в точках x_l ($l = 1, 2$) можна записати

$$\varepsilon \frac{\partial \phi}{\partial x} \Big|_{x_l-0} = \varepsilon \frac{\partial \phi}{\partial x} \Big|_{x_l+0}, \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \phi(x_l-0, t) &= \phi(x_l+0, t); \\ J_S(x_l-0, t) &= J_S(x_l+0, t), \end{aligned} \quad (15)$$

$$C_S(x_l-0, t) = C_S(x_l+0, t) - R_S^{l,l+1} \frac{\partial C_S(x_l+0, t)}{\partial x}$$

Граничні умови

$$\begin{aligned} \phi(0, t) &= 0, \\ \phi(x_3, t) &= -\frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_T} d_T \frac{\partial \phi(x_3, t)}{\partial x}; \\ J_S(x_3, t) &= 0, \end{aligned} \quad (16)$$

$$C_S(0, t) = C_{S0}^B + (C_S^B - C_{S0}^B)(1 - \exp(-t / \Delta)) + R_S^{01} \frac{\partial C_S(0, t)}{\partial x} \quad (17)$$

і початкові умови

$$C_S(x, 0) = C_{S0}^B, \quad (18)$$

де $\varepsilon, \varepsilon_T, d_T$ – відносна діелектрична постійна і товщина матеріалу перетворювача; C_{S0}^B, C_S^B типи концентрацій в досліджуваному розчині при $t = 0$ і $t > 0$, відповідно; $1 / R_S^{l,l+1}$ означає масу коефіцієнту передачі для типу S через інтерфейс між шарами l і $l+1$; Δ – це час рівноваги сталої (Δ вважається набагато меншим, ніж будь-які часові процеси у мембрані).

У роботі [23] розглянуто математичний вираз для рефлексивності багат шарової структури біосенсора для плазмонного резонансу. Розглянутий метод матриці переносу для вивчення різних параметрів продуктивності запропонованої структури для p -поляризованого падаючого світла [24, 25]. Було використано вкладену періодичну багат шарову структур вздовж осі Z , яка показана на рис. 2.

На рис. 3 вектор H (спрямований всередину) має лише одну компоненту H_1 , яка є дотичною до інтерфейсу, а вектор E_1 має компоненту E_{x1} , яка є також дотичною. Зв'язок між дотичною компонентою електричного поля ($E_1^{//}$) і магнітного поля ($H_1^{//}$) на межі першого шару до полів $E_{N-1}^{//}$ і $H_{N-1}^{//}$ для зв'язку останнього шару описується наступним матричним рівнянням, згідно з [26]:

$$\begin{bmatrix} E_1^{//} \\ H_1^{//} \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} E_{N-1}^{//} \\ H_{N-1}^{//} \end{bmatrix}, \quad (19)$$

де M – характеристична матриця об'єднаної структури датчика, який може бути введений з точки зору його послідовних матриць шару.

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} = \prod_{k=2}^{N-1} M_k, \quad (20)$$

У формулі

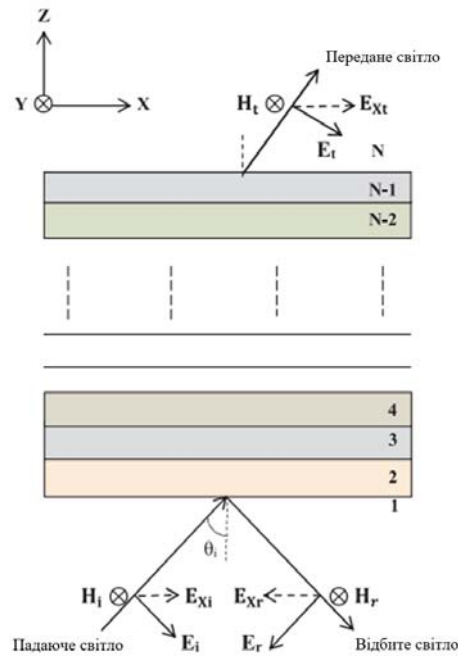


Рис. 3. Схематичне зображення багат шарової моделі р-поляризованого падаючого світла

$$M_k = \begin{bmatrix} \cos \beta_k & -i \sin \beta_k \\ -ip_k \sin \beta_k & \cos \beta_k \end{bmatrix} = \prod_{k=2}^{N-1} M_k,$$

де k , β_k і p_k означають довільне число, фазову товщину та поперечні показники заломлення відповідного шару, які можна розрахувати за формулами:

$$\beta_k = \frac{2\pi d_k}{\lambda} \sqrt{(\epsilon_k - n_0^2 \sin^2 \Theta_0)} \tag{21}$$

$$p_k = \frac{\sqrt{(\epsilon_k - n_0^2 \sin^2 \Theta_0)}}{\epsilon_k} \tag{22}$$

У формулі (21) параметр λ – довжина хвилі вільного простору, а Θ_0 – інцидент кут на базі призми. Коефіцієнт відбиття для р-поляризованої падаючої хвилі визначається за формулою

$$r = \frac{(m_{11} + m_{12} p_N) p_1 - (m_{21} + m_{22} p_N)}{(m_{11} + m_{12} p_N) p_1 + (m_{21} + m_{22} p_N)} \tag{23}$$

Коефіцієнт відбиття (R) об'єднаної багат шарової структури може бути описано за допомогою виразу

$$R = |r|^2 \tag{24}$$

Крива відбиття моделі N -шару з інцидентом кута (Θ_0) побудована для отримання кута резонансу (Θ_{res}), який відповідає мінімальній відбиваючій здатності, що призводить до ефективного збудження плазмонного резонансу.

2. Решітчаста модель імуносенсора, які ґрунтуються на системі диференціальних рівнянь із запізненням.

В [27] запропоновано модель імуносенсора, яка ґрунтується на системі решітчастих диференціальних рівнянь із запізненням.

Нехай $V_{i,j}(t)$ – концентрація антигенів, $F_{i,j}(t)$ – концентрація антитіл в біопікселі (i, j) , $i, j = \overline{1, N}$.

Модель ґрунтується на таких біологічних припущеннях для довільного біопікселя (i, j) .

1. Маємо деяку константу народжуваності, $\beta > 0$ для популяції антигенів.

2. Антигени нейтралізуються антитілами з деякою ймовірнісною швидкістю $\gamma > 0$.

3. Популяція антигенів прагне до деякої межі насичення з швидкістю $\delta_v > 0$.

4. Ми маємо деяку дифузію антигенів з чотирьох сусідніх пікселів $(i-1, j)$, $(i+1, j)$, $(i, j-1)$, $(i, j+1)$, з швидкістю дифузії $D\Delta^{-2}$, де $D > 0$ і $\Delta > 0$ є відстань між пікселями.

5. Ми маємо деяку сталу смертності антитіл $\mu_f > 0$.
6. В результаті імунної відповіді ми збільшуємо щільність антитіл з ймовірнісною швидкістю $\eta\gamma$.
7. Популяція антитіл прагне до деякого рівня насичення з швидкістю $\delta_f > 0$.
8. Імунна відповідь з'являється з деякою сталою затримкою в часі $\tau > 0$.

На основі цього розглянуто дуже просту конструкцію моделі антиген-антитіло із запізненням, для двовимірного масиву біопікселів, яка ґрунтується на добре відомій моделі Марчука [28, 29] і використовує просторовий оператор \hat{S} , запропонований в [30]:

$$\begin{aligned} \frac{dV_{i,j}(t)}{dt} &= (\beta - \gamma F_{i,j}(t-\tau)) - \delta_v V_{i,j}(t-\tau) V_{i,j}(t) + \hat{S}\{V_{i,j}\} \\ \frac{dF_{i,j}(t)}{dt} &= (-\mu_f + \eta\gamma V_{i,j}(t-\tau) - \delta_f F_{i,j}(t) F_{i,j}(t)) F_{i,j}(t) \end{aligned} \quad (25)$$

Модель (25) задана початковими функціями (26):

$$\begin{aligned} V_{i,j}(t) &= V_{i,j}^0(t) \geq 0, \quad F_{i,j}(t) = F_{i,j}^0(t) \geq 0, \quad t \in [-\tau, 0), \\ V_{i,j}(0), \quad F_{i,j}(0) &> 0. \end{aligned} \quad (26)$$

Для квадратного масиву $N \times N$ ми використовуємо таку дискретну дифузію для просторового оператора [31].

$$\hat{S}\{V_{i,j}\} = \begin{cases} D\Delta^{-2} [V_{1,2} + V_{2,1} + V_{i,j-1} - 2nV_{1,1}] & i, j = 1 \\ D\Delta^{-2} [V_{2,j} + V_{1,j-1} + V_{1,j+1} + V_{i,j+1} - 3nV_{i,j}] & i = 1, j \in \overline{2, N-1} \\ D\Delta^{-2} [V_{1,N-1} + V_{2,N} - 2nV_{1,N}] & i, j \in \overline{2, N-1} \\ D\Delta^{-2} [V_{i-1,N} + V_{i+1,N} + V_{i,N-1} - 3nV_{i,N}] & i \in \overline{2, N-1}, j = N \\ D\Delta^{-2} [V_{N-1,N} + V_{N,N-1} - 2nV_{N,N}] & i = N, j = N \\ D\Delta^{-2} [V_{N-1,j} + V_{N,j-1} + V_{N,j+1} + V_{i,j+1} - 3nV_{N,j}] & i = N, j \in \overline{2, N-1} \\ D\Delta^{-2} [V_{N-1,1} + V_{N,2} - 2nV_{N,1}] & i = N, j = 1 \\ D\Delta^{-2} [V_{i-1,1} + V_{i+1,1} + V_{i,2} - 3nV_{i,1}] & i \in \overline{2, N-1}, j = 1 \\ D\Delta^{-2} [V_{i-1,j} + V_{i+1,j} + V_{i,j-1} + V_{i,j+1} - 4nV_{i,j}] & i, j \in \overline{2, N-1} \end{cases} \quad (27)$$

Кожна колонія піддається впливу антигенів, вироблених у чотирьох сусідніх колоніях – дві колонії по кожному напрямку, розділені рівними відстанями Δ .

Ми використовуємо граничну умову $V_{i,j} = 0$ для ребер масиву $i, j = 0, N+1$.

В подальшому використаємо таке позначення для сталої

$$k(i, j) = \begin{cases} 2 & i, j = 1 \quad i = 1, j = N \quad i = N, j = N \quad i = N, j = 1 \\ 3 & i = 1, j \in \overline{2, N-1} \quad i \in \overline{2, N-1}, j = N \quad i = N, j \in \overline{2, N-1} \\ & i \in \overline{2, N-1}, j = 1 \\ 4 & i, j \in \overline{2, N-1} \end{cases} \quad (28)$$

Формула (28) використовується в перетвореннях із просторовим оператором (27).

За допомогою чисельного моделювання можна побачити, що якісна поведінка системи визначається головним чином часом імунної відповіді τ (або часом запізнення), швидкістю дифузії $D\Delta^{-2}$ і сталою n .

Висновки

В роботі проведено огляд математичних моделей біосенсорів та імуносенсорів. Розглянуто статичну модель біосенсора на основі поверхневого плазмонного резонансу. Представлено оптичні моделі біосенсора на основі призми та з використанням світловода. Проаналізовано статичну математичну модель оцінювання терміну експлуатації біосенсорів. Розглянуто статичну модель біосенсора з багатошаровою структурою. Запропонована математична модель для визначення втрати експлуатаційних характеристик біосенсора може застосовуватися для різних ферментних біосенсорів. Зроблено висновок, що електрохімічні біосенсори, з віком за підвищених температур швидше втрачають свої експлуатаційні характеристики.

Розглянуто біосенсор для експрес-вимірювання концентрації глюкози з можливістю контролю якості продуктів харчування та медицині. Запропоновано динамічну модель імуносенсора, яка ґрунтується на системі решітчастих диференціальних рівнянь із запізненням, яка враховує наявність колоній антигенів та антитіл, що локалізовані у пікселях, а також дифузію колоній антигенів між пікселями. Введено клас решітчастих різницевих рівнянь із запізненням в часі для моделювання взаємодії “антиген-антитіло” в пікселях імуносенсора. Модель ґрунтується на низці біологічних припущень щодо взаємодії колоній

антигенів та антитіл, а також дифузії антигенів. Для опису дискретних у просторі колоній, локалізованих у відповідних пікселях, використано апарат диференціальних рівнянь на прямокутній решітці. Розглянуті в роботі моделі біосенсорів та імуносенсорів можуть бути використані для проектування імуносенсорних пристроїв з можливістю контролю параметрів, які б забезпечували їх операційну стійкість.

References

1. L. Mosinska, K. Fabisiak, K. Paprocki, M. Kowalska, P. Popielarski, M. Szybowski, A. Stasiak, et al., "Diamond as a transducer material for the production of biosensors", *Przemysl Chemiczny*, vol. 92, no. 6, pp. 919–923, 2013.
2. C. Adley, "Past, present and future of sensors in food production", *Foods*, vol. 3, no. 3, pp. 491–510, Aug. 2014. DOI: 10.3390/foods3030491. [Online]. URL: <https://doi.org/10.3390/foods3030491>.
3. Kłos-Witkowska, "Enzyme-based fluorescent biosensors and their environmental, clinical and industrial applications", *Polish Journal of Environmental Studies*, vol. 24, pp. 19–25, 2015. DOI: 10.15244/pjoes/28352. [Online]. URL: <https://doi.org/10.15244/pjoes/28352>.
4. M. Burnworth, S. Rowan, and C. Weder, "Fluorescent sensors for the detection of chemical warfare agents", *Chemistry - A European Journal*, vol. 13, no. 28, pp. 7828–7836, Sep. 2007. DOI: 10.1002/chem.200700720. [Online]. URL: <https://doi.org/10.1002/chem.200700720>.
5. P. Mehrotra, "Biosensors and their applications – a review", *Journal of Oral Biology and Craniofacial Research*, vol. 6, no. 2, pp. 153–159, May 2016. DOI: 10.1016/j.jobcr.2015.12.002. [Online]. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jobcr.2015.12.002>.
6. Martsenyuk V.P. Study of classification of immunosensors from viewpoint of medical tasks / A. Kłos-Witkowska, A.S. Sverstiuk // *Medical informatics and engineering*. – 2018. – № 1(41). – pp. 13–19. DOI: <https://dx.doi.org/10.11603/mie.1996-1960.2018.1.8887>.
7. Bihuniak T.V. Deiaki aspekty vykorystannia imunosensoryv u medytsyni / T.V. Bihuniak, A.S. Sverstiuk, K.O. Bihuniak // *Medychnyi forum*. – 2018. – № 14 (14). – S. 8–11.
8. Martsenyuk V.P. On principles, methods and areas of medical and biological application of optical immunosensors / A. Kłos-Witkowska, A.S. Sverstiuk, T.V. Bihuniak // *Medical informatics and engineering*. – 2018. – № 2 (42). – pp. 28–36. DOI: <https://dx.doi.org/10.11603/mie.1996-1960.2018.2.9289>.
9. Moina and G. Ybarra, "Fundamentals and applications of immunosensors", *Advances in immunoassay technology*, pp. 65–80, 2012.
10. Kłos-Witkowska, "The phenomenon of fluorescence in immunosensors", *Acta Biochimica Polonica*, vol. 63, no. 2, pp. 215–221, 2016. DOI: 10.18388/abp.2015_1231. [Online]. URL: https://doi.org/10.18388/abp.2015_1231.
11. T. D. Gibson, "Biosensors: The stability problem", *Analisis*, vol. 27, no. 7, pp. 630–638, 1999.
12. M. Saifur Rahman, Khaleda Akter Rikta, Labid Bin Bashar, M.S. Anower, Numerical analysis of graphene coated surface plasmon resonance biosensors for biomedical applications, *Optik*, Volume 156, 2018, Pages 384–390, ISSN 0030-4026, <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2017.11.057>.
13. F. Achi, S. Bourouina-Bacha, M. Bourouina, A. Amine, Mathematical model and numerical simulation of inhibition based biosensor for the detection of Hg(II), *Sensors and Actuators B: Chemical*, Volume 207, Part A, 2015, pp. 413–423, ISSN 0925-4005, URL: <https://doi.org/10.1016/j.snb.2014.10.033>.
14. Y. Kuang, *Delay differential equations with applications in population dynamics*. New York: Academic Press, 1993.
15. Каттралл Р. В. Химические сенсоры / Каттралл Роберт В. – М. : Научный мир, 2000. – 25 с.
16. Nuno Miguel Matos Pires, Tao Dong , Ulrik Hanke, Nils Hoivik. Recent developments in Optical detection technologies in Lab-on-a-Chip devices for biosensing applications // *Sensors* 2014, 14, pp. 15458–15479; DOI: 10.3390/s140815458.
17. Jonsson U., Fagerstam L., Ivarsson B. Real-time biospecific interaction analysis using surface plasmon resonance and a sensor chip technology // *BioTechniques*. – 1991. – Vol.11 – pp. 620–627.
18. M. Saifur Rahmana, Khaleda Akter Riktaa, Labid Bin Bashar, M.S. Anower, Numerical analysis of graphene coated surface plasmon resonance biosensors for biomedical applications, *Optik* 156 (2018), pp. 384–390.
19. K.N. Shushama, M.M. Rana, R. Inum, M.B. Hossain, Graphene coated fiber optic surface plasmon resonance biosensor for the DNA hybridization detection: simulation analysis, *Opt. Commun.* 383 (2017), pp. 186–190.
20. H. Fu, S. Zhang, H. Chen, J. Weng, Graphene enhances the sensitivity of fiber-Optic surface plasmon resonance biosensor, *IEEE Sens. J.* 15 (10) (2015).
21. Peter Panjan, Vesa Virtanen, Adama Marie Sesay, Determination of stability characteristics for electrochemical biosensors via thermally accelerated ageing, *Talanta* 170 (2017), pp. 331–336.
22. V. Rossokhaty, N. Rossokhata, Mathematical model of a biosensor with multilayer charged membrane, *Computer Physics Communications* 147 (2002), pp. 366–369.
23. Angad S. Kushwaha, Anil Kumar, Rajeev Kumar, S.K. Srivastava, A study of surface plasmon resonance (SPR) based biosensor with improved sensitivity, *Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications* 31 (2018), pp. 99–106.

24. M. Yamamoto, Surface plasmon resonance (SPR) theory, Tutor., Rev. Polarogr. 48 (2002) 209.
25. Y. Ma, G. Farrell, Y. Semenova, H.P. Chan, H. Zhang, Q. Wu, Sensitivity enhancement for a multimode fiber sensor with an axisymmetric metal grating layer, Photon. Nanostruct. – Fundam. Appl. 12 (2014), pp. 69–74.
26. P.K. Maharana, R. Jha, Pu. Padhy, On the electric field enhancement and performance of SPR gas sensor based on graphene for visible and near infrared, Sens. Actuators B 207 (2015), pp. 117–122.
27. Martsenyuk V. Stability, bifurcation and transition to chaos in a model of immunosensor based on lattice differential equations with delay / A. Klos-Witkowska, A. Sverstiuk // Electronic Journal of Qualitative Theory of Differential Equations: No. 2018(27), pp. 1–31. DOI: 10.14232/ejqtde.2018.1.27.
28. C. McCluskey, “Complete global stability for an SIR epidemic model with delay – distributed or discrete”, Nonlinear Analysis: Real World Applications, vol. 11, no. 1, pp. 55–59, Feb. 2010. DOI: 10.1016/j.nonrwa.2008.10.014. [Online]. URL: <https://doi.org/10.1016/j.nonrwa.2008.10.014>.
29. Nakonechny and V. Marzeniuk, “Uncertainties in medical processes contro”, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, vol. 581, pp. 185–192, 2006, cited By 2. DOI: 10.1007 / 3 - 540 - 35262 - 7 _ 11. [Online]. URL: https://www.scopus.com/inward / record . uri ? eid = 2 - s2 . 0 - 53749093113 & doi = 10 . 1007 % 2f3 - 540 - 35262 - 7 _ 11&partnerID=40&md5=03be7ef103cbbc1e94cacbb471daa03f.
30. Prindle, P. Samayoa, I. Razinkov, T. Danino, L. S. Tsimring, and J. Hasty, “A sensing array of radically coupled genetic ‘biopixels’”, Nature, vol. 481, no. 7379, pp. 39–44, Dec. 2011. DOI: 10.1038/nature10722. [Online]. URL: <https://doi.org/10.1038/nature10722>.
31. Prindle, P. Samayoa, I. Razinkov, T. Danino, L. S. Tsimring, and J. Hasty, “A sensing array of radically coupled genetic ‘biopixels’”, Nature, vol. 481, no. 7379, pp. 39–44, Dec. 2011. DOI: 10.1038/nature10722. [Online]. URL: <https://doi.org/10.1038/nature10722>.

Рецензія/Peer review : 20.3.2019 р.

Надрукована/Printed : 10.4.2019 р.
Рецензент: д. т. н., проф. Лупенко С. А.

В. Г. ДОЗОРСЬКИЙ, Є. Б. ЯВОРСЬКА, О. Ф. ДОЗОРСЬКА,
І. Ю. ДЕДІВ, Л. Є. ДЕДІВ, І. М. ПАНЬКІВ
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

СТРУКТУРА СИСТЕМИ ВІДБОРУ БІОСИГНАЛІВ ДЛЯ ЗАДАЧІ ВІДНОВЛЕННЯ КОМУНІКАТИВНОЇ ФУНКЦІЇ ЛЮДИНИ

Проведено обґрунтування структури та способів апаратної реалізації системи відбору електроенцефалографічних та електроміографічних сигналів для задачі відновлення комунікативної функції мови людини із застосуванням медичного електроенцефалографа та блока підсилення біопотенціалів.

Ключові слова: біосигнал, система відбору, комунікативна функція.

V. G. DOZORSKYI, E. B. YAVORSKA, O. F. DOZORSKA, I. YU. DEDIV, L. YE. DEDIV, I. M. PANKIV
Ternopil Ivan Puluj National Technical University

THE STRUCTURE OF BIOSIGNALS SELECTION SYSTEM FOR THE TASK OF HUMAN COMMUNICATIVE FUNCTION RESTORING

In the world, there is an increase in number of people with limited or lost communicative function. Therefore, it is important to develop effective technical means of compensation or restoration of this function using indirect methods, based on the selection and processing the biosignals, that arise during the implementation of the communicative function. In this case, the quality, informative nature of such biosignals depends on the qualitative and quantitative parameters of the selection system. The work is devoted to the justification of the structure of the selection system and the parameters of its elements in order to ensure homogeneity of the statistical material, which is the selected biosignals, produced during the communicative function implementation. In order to restore the communicative function, it is proposed to use a method, based on the synchronous selection and processing of two groups of biosignals: electromyographic (EMG) signals, selected from the neck surface near the vocal folds; electroencephalographic (EEG) signals, selected from the surface of the patient's head near the linguistic centers. Taking into account the similarity of EEG and EMG signals, the possibility of selecting of such signals using one multichannel electroencephalograph, has been analysed. It is established, that such a selection is possible only in the case of expansion the frequency band of input signals, since the upper limit frequency of electroencephalographs usually does not exceed 100 Hz, but this is not enough for the selection of EMG signals, since their structure contains signs of the main tone, whose frequency values may be in the frequency range of 80-450 Hz. The structure of the selection system and preliminary processing of such biosignals is proposed, which includes two independent channels of biopotentials amplification with an extended bandwidth. Additionally, in the structure of the system for conducting experimental research and obtaining a reference signal, the signs of which are manifested in the structure of EEG and EMG signals, a parallel selection of voice signals using a microphone, was performed. On the basis of these vocal signals, the informative features of individual vowel and consonant vocalized sounds in the structure of EEG and EMG signals were performed. Using the proposed structure of the selection system, it is possible to implement technical means for the indirect restoration of the human communicative function.

Keywords: biosignal, selection system, communicative function.

Постановка проблеми

Комунікативна функція є найважливішим засобом обміну інформацією між людьми та в повній мірі може бути реалізована при повноцінному функціонуванні мовних відділів центральної нервової системи, дихальної системи і органів голосового апарату [1]. Однак спостерігається зростання кількості людей із обмеженою або втраченою комунікативною функцією, зокрема через порушення роботи цих трьох систем або травми. Тому, задача пошуку способів відновлення комунікативної функції як найважливішого засобу спілкування людей є актуальною для медицини.

У випадках, коли класичні методи реабілітації, що ґрунтуються на відновленні функціонування органів, що реалізують комунікативну функцію, не дають належного результату, актуальним є розроблення ефективних технічних засобів компенсації чи відновлення цієї функції із використанням опосередкованих методів, які ґрунтуються на відборі та опрацюванні біосигналів, що виникають в процесі реалізації комунікативної функції. Такі технічні засоби дадуть можливість проведення ефективної реабілітації комунікативної функції і в тих випадках, коли відновити функціонування окремих органів, зокрема голосового апарату, неможливо. При цьому, якість, інформативність таких біосигналів, опрацювання яких проводиться з метою відшукування ознак реалізації комунікативної функції для компенсації порушень її роботи, залежить від якісних та кількісних параметрів системи відбору.

Аналіз останніх досліджень

В області біомедичної інженерії існує ряд опосередкованих способів, що можуть бути використані для задачі відновлення комунікативної функції мови. Основою цих способів є відбір та опрацювання електроенцефалографічних (ЕЕГ) [2], електроміографічних (ЕМГ) сигналів, що зареєстровані з мімічних м'язів обличчя [3], та ЕМГ сигналів, що зареєстровані з поверхні шиї пацієнта [4]. Однак, цим способам притаманні недоліки, пов'язані з недостатньою їхньою інформативністю, оскільки в структурі ЕМГ сигналів, відібраних з мімічних м'язів обличчя, буде міститись інформація лише про роботу артикуляційного апарату; у структурі ЕМГ сигналів, відібраних з поверхні шиї, буде міститись інформація лише про роботу голосових складок; опрацювання ЕЕГ сигналів передбачає усунення усіх артефактів, пов'язаних із роботою інших відділів головного мозку (зокрема зору, слуху тощо), врахування способів кодування і перенесення мовної інформації в потоках нервових імпульсів в нейронних структурах мовних

центрів головного мозку та особливостей відображення цих процесів на поверхні голови пацієнта.

Перспективним є спосіб відновлення комунікативної функції людини, який ґрунтується на відборі та опрацюванні достатньої з точки зору інформативності кількості та типів біосигналів для забезпечення можливості проведення ідентифікації та розпізнавання окремих голосових фонем чи слів. При цьому, важливим є забезпечення можливості синхронної реєстрації таких біосигналів з використанням єдиної системи відбору.

Формулювання цілей статті

В роботі проводиться обґрунтування структури системи відбору біосигналів та параметрів її складових елементів з метою забезпечення однорідності статистичного матеріалу, що ним є відібрані біосигнали, продуковані в процесі реалізації комунікативної функції.

Результати дослідження

В працях [5, 6] описано суть методу відбору та опрацювання біосигналів для розв'язання задачі відновлення комунікативної функції, що ґрунтується на положеннях акустичної теорії голосотворення та нейрохронаксічної теорії фонації [7] – в потоці видихуваного повітря (1) джерело сигналу (легені, голосові складки) формує звуковий сигнал з характерною повторюваністю – основним тоном (3), що генерується голосовими складками, котрі збуджуються послідовністю нервових імпульсів (2) (рис. 1).

Відповідно нервові імпульси, які в процесі вимови слів чи фраз керують роботою голосового апарату в під час реалізації комунікативної функції, формуються в окремих мовних центрах головного мозку і повинні проявлятися у структурі ЕЕГ сигналів, що відібрані з поверхні голови в безпосередній близькості до цих мовних центрів. Однак, під час проведення експериментальних досліджень [5, 6] було встановлено, що використовуючи класичні методи ЕЕГ досліджень можна лише встановити факт наявності процесу мовлення, але розпізнати окремі слова чи фрази практично неможливо через обмежені можливості сучасних електроенцефалографів (приладів для відбору ЕЕГ сигналів) та самого методу ЕЕГ досліджень [5, 6].

Для ефективного розпізнавання голосових сигналів і відновлення функції мови пропонується використати метод, що ґрунтується на синхронному відборі та опрацюванні двох груп сигналів: перші є сигналами, що відібрані з окремих органів голосового апарату – ЕМГ сигнали, відібрані з поверхні ший поблизу голосових складок; інша група – це ЕЕГ сигнали, локалізовано відібрані з ділянок поверхні голови пацієнта, що розташовані поблизу мовних центрів. В структурі останньої групи сигналів будуть відображатися електричні образи нервових імпульсів, які ці центри будуть посиляти до відповідних органів голосового апарату як ніби під час вимовлення конкретного слова чи фрази.

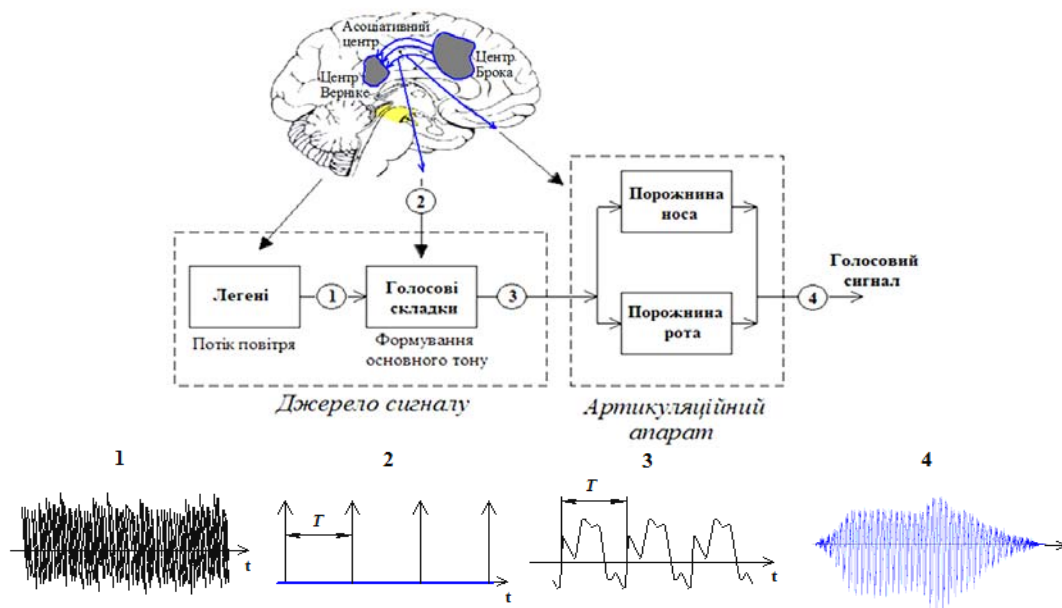


Рис. 1. Процес творення голосових сигналів при реалізації комунікативної функції

Беручи до уваги подібність ЕЕГ та ЕМГ сигналів за структурою та параметрами і припущення, що ознаки реалізації комунікативної функції будуть найкращим чином проявлятися в структурі ЕЕГ сигналів, котрі були відібрані з поверхні голови пацієнта поблизу мовних центрів головного мозку, можливим стає відбір ЕЕГ та ЕМГ сигналів з допомогою одного багатоканального електроенцефалографа. На рис. 2 позначено відведення для випадку застосування 16-канального електроенцефалографа Нейроком (ХАІ Медіка).

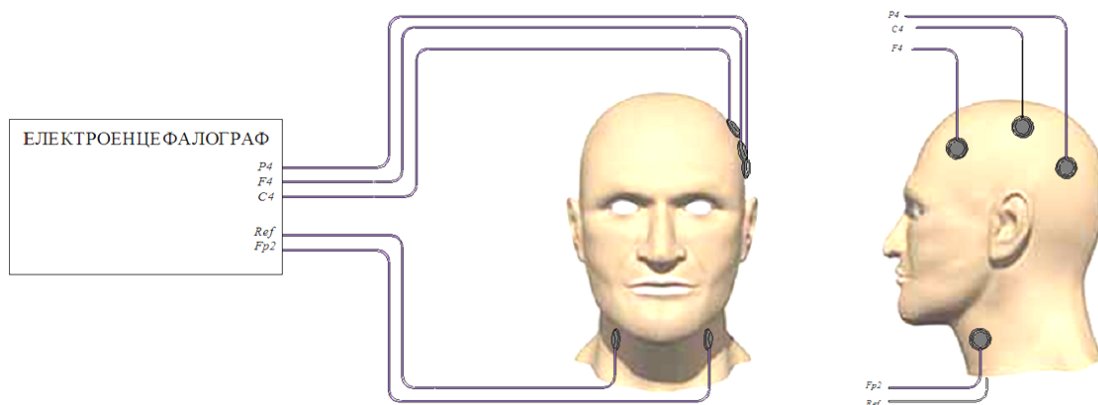


Рис. 2. Спосіб відбору EEG та EMГ сигналів за допомогою одного електроенцефалографа

Однак, застосування для відбору EEG та EMГ сигналів одного електроенцефалографа (в дослідженнях застосовувався електроенцефалограф Нейроком, ХАІ Медіка) можливе лише у випадку розширення частотної смуги пропускання вхідних сигналів, оскільки верхня гранична частота становить 100 Гц [8]. Цього недостатньо при відборі EMГ сигналів, оскільки в їх структурі містяться ознаки основного тону при вимовленні голосних чи приголосних вокалізованих звуків (значення частоти основного тону можуть знаходитись в частотному діапазоні 80–450 Гц [9, 10]). Розширення смуги частот, в свою чергу, призведе до необхідності підвищення частоти дискретизації вхідних сигналів. У випадку застосування стандартного електроенцефалографа, завдання розширення смуги частот пропускання та підвищення частоти дискретизації стає технічно складним. Тому запропоновано структуру системи відбору та попереднього опрацювання таких біосигналів, що наведена на рис. 3. Літерами А, В та С позначено ділянки накладання електродів для відбору EEG сигналів поблизу мовних центрів, літерами D, Е – область накладання електродів для відбору EMГ сигналів.

Обидві групи сигналів надходять на незалежні блоки попереднього підсилення, режекторної фільтрації складових сигналів на частоті 50 Гц та блоки підсилення. Після оцифрування ці сигнали надходять на обчислювальний пристрій, який власне і виконує їхнє опрацювання.

Додатково в структурі системи для початкових етапів «навчання» програмного забезпечення та отримання еталонного сигналу, ознаки якого проявляються у структурі EEG та EMГ сигналів, здійснювався паралельний відбір голосових сигналів з допомогою мікрофона *M*. На основі цих сигналів проводилось виділення інформативних ознак окремих голосних та приголосних вокалізованих звуків в структурі EEG та EMГ сигналів.

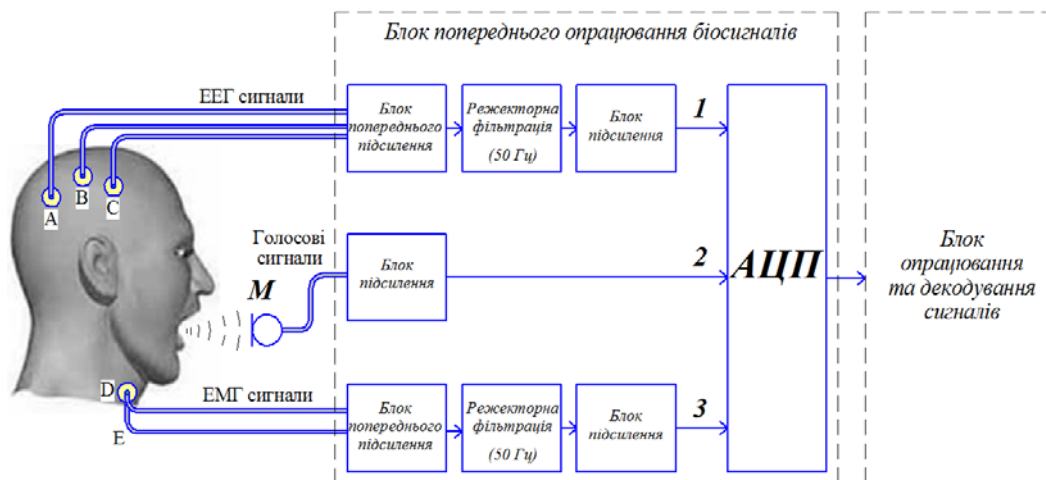


Рис. 3. Структура системи відбору та опрацювання біосигналів для відновлення комунікативної функції мови

В ході експериментальних досліджень було практично реалізовано у вигляді окремого модуля блок підсилення біопотенціалів, що придатний для відбору як EEG так і EMГ сигналів та являє собою один канал підсилення електроенцефалографа. Виконаний він на основі інструментальних підсилювачів AD620 із типовою схемою їхнього включення. На рис. 4 наведено функціональну схему процесу відбору голосових та EMГ сигналів із використанням такого блока підсилення біопотенціалів.

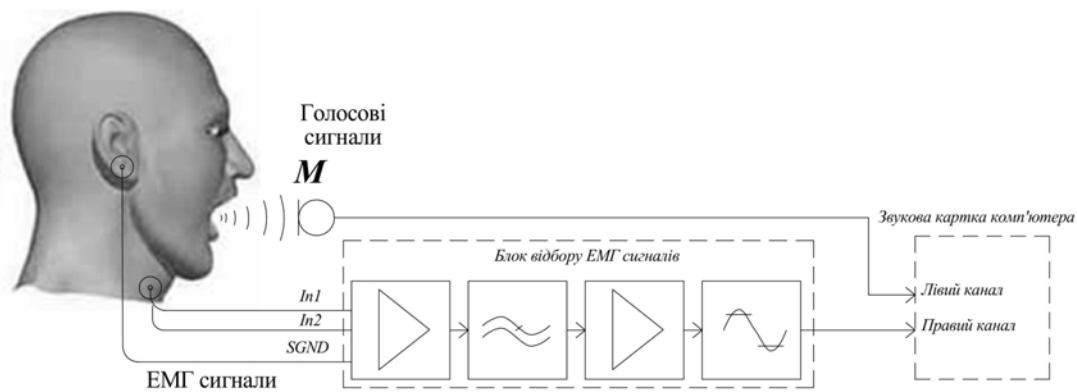


Рис. 4. Функціональна схема блоку відбір ЕМГ та голосових сигналів

З виходу блоку підсилення біопотенціалів корисний сигнал подавався на один із входів звукової картки персонального комп'ютера. На інший вхід подавався сигнал із мікрофона, котрий вибирався, виходячи з рекомендацій, що наведені в праці [11]. Для власне запису зазначених біосигналів було застосовано програмний пакет Adobe Audition, що має можливість синхронного запису багатьох сигналів. Значення частоти дискретизації та розрядності АЦП звукової картки також вибирались на основі рекомендацій [11].

Після завершення процесу навчання програмного забезпечення при опрацюванні ЕМГ сигналів з метою пошуку в їхній структурі ознак основного тону голосового сигналу, замість мікрофона пропонується використати ідентичний блок підсилення біопотенціалів для синхронного відбору ЕЕГ сигналів.

Висновки

Запропоновано структуру системи відбору ЕЕГ та ЕМГ сигналів, що ґрунтується на використанні ідентичних блоків підсилення біопотенціалів із розширеною смугою пропускання в порівнянні з вузлами підсилення біопотенціалів медичних електроенцефалографів. Використовуючи запропоновану структуру системи відбору, можна реалізувати технічні засоби для опосередкованого відновлення комунікативної функції людини.

Література

1. Джафек Брюс. Секреты оториноларингологии / Б. Джафек, Е. Старк ; [под ред. Новикова Н. И., Овчинникова А. Ю. ; пер. с англ.]. – М., СПб : БИОНОМ : Невский диалект, 2001. – 624 с. – ISBN 5-79870197-1.
2. Porbadnigk M.W. EEG-Based Speech Recognition: Impact of Temporal Effects / M.W. Porbadnigk, T. Schultz // 2nd International Conference on Bio-inspired Systems and Signal Processing. – Porto : Portugal, 2009.
3. Jia Xueqian. Unvoiced Speech Recognition Based on One-Channel Facial Myoelectric Signal / Jia Xueqian, Jinghong Li, Yuyuan Du // The Sixth World Congress on Intelligent Control and Automation. – 2008, – P. 9362–9366.
4. Ambient Corporation. Buy Audeo Basic SDK. URL: <http://www.theaudeo.com/?action=buy>.
5. Дозорський В.Г. Відбір та опрацювання біосигналів для задачі відновлення комунікативної функції мови людини / В.Г. Дозорський, О.Ф. Дозорська, Є.Б. Яворська // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук : КрНУ, 2017. – Випуск 4(105). – С. 9–14.
6. Яворська Є.Б. Метод відновлення комунікативної функції мови людини / Є.Б. Яворська, О.Ф. Дозорська // Сборник статей научно-информационного центра «Знание» по материалам X международной заочной научно-практической конф. «Развитие науки в XXI веке» (уровень стандарта, академический уровень). – Харьков : Научно-информационный центр «Знание», 2016. – Ч. 1. – С. 38–41.
7. Дозорський В.Г. Застосування нейрохронакської теорії фонації для задачі відновлення комунікативної функції мови людини / В.Г. Дозорський, О.Ф. Дозорська, Л.Є. Дедів, І.Ю. Дедів, Є.Б. Яворська // Znanstvena misel. – Slovenia, 2017. – № 12. – С. 57–61.
8. НейроКом. Комплекс электроэнцефалографический ТУ У 33.1-02066769-001-2002 Инструкция по медицинскому применению АИНЦ.941311.001 И1 / Национальный аэрокосмический университет «ХАИ» НТЦ радиоэлектронных медицинских приборов и технологий «ХАИ-МЕДИКА». – Харьков : ХАИ «Медика», 2011. – 168 с.
9. Деркач М.Ф. Динамические спектры речевых сигналов / М.Ф. Деркач, Р.Я. Гумецкий, Б.М. Гура, М.Е. Чабан. – Л. : Вища школа. Изд-во при Львов. ун-те, 1983. – 168 с.
10. Рабинер Лоренс. Цифровая обработка речевых сигналов / Л. Рабинер, Р. Шафер ; [под ред. М.В. Назарова, Ю.Н. Прохорова ; пер. с англ.]. – М. : Радио и связь, 1981. – 496 с.
11. Бачинський М.В. Обґрунтування структури системи відбору акустичних сигналів для задач медичної діагностики систем дихання та голосотворення / М.В. Бачинський, В.Г. Дозорський, І.Ю. Дедів // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – Хмельницький : ХНУ, 2011. – № 3. –

References

1. Dzhafek Brjus. Sekrety otorinolaringologii / B. Dzhafek, E. Stark ; [pod red. Novikova N. I., Ovchinnikova A. Ju. ; per. s angl.]. – M., SPb : BIONOM : Nevskij dialekt, 2001. – 624 s. – ISBN 5-79870197-1.
2. Porbadnigk M.W. EEG-Based Speech Recognition: Impact of Temporal Effects / M.W. Porbadnigk, T. Schultz // 2nd International Conference on Bio-inspired Systems and Signal Processing. – Porto : Portugal, 2009.
3. Jia Xueqian. Unvoiced Speech Recognition Based on One-Channel Facial Myoelectric Signal / Jia Xueqian, Jinghong Li, Yuyuan Du // The Sixth World Congress on Intelligent Control and Automation. – 2008, – R. 9362–9366.
4. Ambient Corporation. Buy Audeo Basic SDK. URL: <http://www.theaudeo.com/?action=buy>.
5. Dozorskyi V.H. Vidbir ta opratsiuvannya biosyhnaliv dlia zadachi vidnovlennia komunikatyvnoi funktsii movy liudyny / V.H. Dozorskyi, O.F. Dozorska, Ye.B. Yavorska // Visnyk Kremenchutskoho natsionalnoho universytetu imeni Mykhaila Ostrohradskoho. – Kremenchuk : KrNU, 2017. – Vypusk 4(105). – S. 9–14.
6. Yavorska Ye.B. Metod vidnovlennia komunikatyvnoi funktsii movy liudyny / Ye.B. Yavorska, O.F. Dozorska // Sbornik statej nauchno-informacionnogo centra «Znanie» po materialam X mezhdunarodnoj zaochnoj nauchno-prakticheskoy konf. «Razvitie nauki v XXI veke» (uroven' standarta, akademicheskij uroven'). – Har'kov : Nauchno-informacionnyj centr «Znanie», 2016. – Ch. 1. – S. 38–41.
7. Dozorskyi V.H. Zastosuvannya neirokhronaksychnoi teorii fonatsii dlia zadachi vidnovlennia komunikatyvnoi funktsii movy liudyny / V.H. Dozorskyi, O.F. Dozorska, L.Ie. Dediv, I.Iu. Dediv, Ye.B. Yavorska // Znanstvena misel. – Slovenia, 2017. – № 12. – S. 57–61.
8. NejroKom. Kompleks jelectrojencefalograficheskij TU U 33.1-02066769-001-2002 Instrukcija po medicinskomu primeneniju AINC.941311.001 II / Nacional'nyj ajerokosmicheskij universitet «HAI» NTC radioelektronnyh medicinskih priborov i tehnologij «HAI-MEDIKA». – Har'kov : HAI «Medika», 2011. – 168 s.
9. Derkach M.F. Dinamicheskie spektry rechevyh signalov / M.F. Derkach, R.Ja. Gumeckij, B.M. Gura, M.E. Chaban. – L. : Vishha shkola. Izd-vo pri L'vov. un-te, 1983. – 168 s.
10. Rabiner Lorens. Cifrovaja obrabotka rechevyh signalov / L. Rabiner, R. Shafer ; [pod red. M.V. Nazarova, Ju.N. Prohorova ; per. s angl.]. – M. : Radio i svjaz', 1981. – 496 s.
11. Bachynskiy M.V. Obgruntuvannya struktury systemy vidboru akustychnykh signaliv dlia zadach medychnoi diahnozyky system dykhannia ta holosotvorennia / M.V. Bachynskiy, V.H. Dozorskyi, I.Iu. Dediv // Herald of Khmelnytskyi National University. – Khmelnytskyi : KhNU, 2011. – № 3. – S. 192–195.

Рецензія/Peer review : 11.2.2019 р.

Надрукована/Printed : 10.4.2019 р.

Рецензент: д. т. н., проф. Паламар М. І.

Д. В. ГАВРІЛОВ, А. Ю. ВОЛОВИК, Н. М. ГАВРІЛОВА,
Н. В. КОФАНОВА, Д. В. ЯРОВИЙ
Вінницький національний технічний університет

УНІВЕРСАЛЬНИЙ РЕГІСТР НА ПЛІС

В даній статті розглядається запропоноване нове схемне рішення універсального регістра на ПЛІС, що дозволяє виконувати функції послідовних, паралельних, послідовно-паралельних та паралельно-послідовних регістрів і крім цього забезпечити режими відключення входів і виходів від загальної інформаційної шини, переключення функцій приймання/передавання інформації в загальну шину. Реалізація реверсивних регістрів зсуву довільної розрядності без зміни вихідного коду в точці реверсу дозволяє створювати гнучкі системи на основі стандартних інтегральних мікросхем жорсткої логіки. Викладено результат моделювання схеми універсального регістра зсуву на ПЛІС у програмному забезпеченні САПР Altera Quartus II із часовими діаграмами.

Ключові слова: універсальний регістр, реверсивний регістр довільної розрядності, гнучкі системи стеження, інтегральні мікросхеми жорсткої логіки, програмовані логічні інтегральні схеми, Quartus, Altera, Intel.

D. V. HAVRILOV, A. Y. VOLOVYK, N. M. HAVRILOVA, N. V. KOFANOVA, D. V. YAROVYI
Vinnytsia National Technical University

UNIVERSAL REGISTER ON FPGA

In this article, we consider the proposed new circuit decision of the universal register on the FPGA, which allows to perform functions of successive, parallel, serial parallel and parallel-sequential registers, and also provide the modes of disconnection of inputs and outputs from the general information bus, the switching functions of reception / transmission of information in the general tire. The reversible registers of arbitrary bit displacement without changing the source code at the reverse point, which allows the creation of flexible monitoring systems based on standard integrated circuits of rigid logic. The results of modelling of the universal shift register on the FPGA in the software of CAD Altera Quartus II with time charts are presented.

Keywords: universal register, reverse register of arbitrary digit capacity, flexible tracking systems, hard logic integrated circuits, programmable logic integrated circuits, Quartus, Altera, Intel.

Вступ

Регістри належать до однієї з найпоширеніших груп цифрових послідовнісних пристроїв. До сфер застосування регістрів відносяться:

- збереження необхідного коду протягом визначеного часу;
- запам'ятовування декількох послідовних значень вхідного коду, що змінюється; це дозволяє порівнювати попереднє значення коду з наступним значенням цього ж коду і виконувати арифметичні операції над даним кодом, тобто регістр в даному випадку відіграє роль елементу лінії затримки, що зберігає послідовність зміни вхідного коду;
- конвеєрна обробка, що дозволяє значно підвищити тактову частоту роботи схеми, за рахунок паралельної роботи блоків схеми;
- накопичувачі результатів обчислень, такі як накопичувальний суматор та пристрій для визначення максимального значення вхідного коду;
- сполучення ЕОМ і радіоелектронних приладів із зовнішніми пристроями, зокрема, з метою індикації і введення-виведення інформації, перетворення її для передавання на далекі відстані [1].

Залежно від способу записування і зчитування інформації регістри поділяються на два основні типи: паралельні і зсуву. До одного з різновидів регістрів відносяться універсальні регістри зсуву, що володіють властивостями вище перерахованих пристроїв. Також такий тип цифрових послідовнісних пристроїв забезпечує режими відключення входів та виходів від загальної інформаційної шини та перемикання функцій приймання/передавання інформації в спільну шину [2, 3].

Але такі цифрові послідовнісні пристрої, як універсальні регістри зсуву мають ряд недоліків:

- потреба в значному ресурсі інтегральної схеми через складні міжрозрядні зв'язки;
- втрата гнучкості керування через необхідність перемикання входів та виходів послідовного введення/виведення;
- ускладнення реалізації реверсивних регістрів зсуву, кільцевих регістрів тощо довільної розрядності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Відомі регістри, які складаються з D- або JK-тригерів з асинхронними входами та логічних елементів (І-АБО-НЕ та інверторів). У таких регістрах паралельне введення інформації в асинхронному режимі відбувається через несинхронізовані входи, а синхронне паралельне введення – через систему керування зсувом [4].

Основними недоліками зазначених пристроїв є потреба в значному ресурсі інтегральної схеми через складні міжрозрядні зв'язки; втрата гнучкості керування через необхідність перемикання входів та виходів послідовного введення/виведення та ускладнення реалізації реверсивних регістрів зсуву, кільцевих регістрів тощо довільної розрядності [4].

Постановка завдання

Метою дослідження є створення регістра, в якому нове схемне рішення дозволило виконувати функції послідовних, паралельних, послідовно-паралельних та паралельно-послідовних регістрів і крім цього забезпечити режими відключення входів і виходів від загальної інформаційної шини, переключення функцій приймання/передавання інформації в загальну шину, а також реалізація реверсивних регістрів зсуву довільної розрядності без зміни вихідного коду в точці реверсу, що дозволяє створювати гнучкі системи стеження на основі стандартних інтегральних мікросхем жорсткої логіки.

Виклад основного матеріалу дослідження

Поставлена задача вирішується тим, що до звичайного регістра зсуву довільної розрядності з входами і виходами паралельного введення/виведення (рис. 1) додається мультиплексор шин та пристрій керування. Шинні входи мультиплексора шин з'єднуються з виходами регістра зсуву двома шинами: одна шина $Q_{пр} []$ утворюється з потрібної кількості розрядів регістра зсуву, починаючи з молодшого, в прямому порядку їх нумерації, а друга шина $Q_{зв} []$ – з тих самих розрядів у зворотному порядку їх нумерації, причому друга шина з'єднується також зі входами паралельного введення регістра зсуву. Із синхросигналу CLK, що одночасно надходить до регістра зсуву і пристрою керування, та сигналу керування напрямком зсуву UP/DN, який одночасно є адресним входом мультиплексора шин, у пристрої керування формуються сигнали керування, якими здійснюється запис зворотного коду $Q_{зв} []$ під час зміни напрямку зсуву, наприклад, два сигнали: сигнал, що подається на вхід регістра зсуву MODE, тобто перемикає регістр з послідовного в паралельний та навпаки і імпульс завантаження, що подається на інверсний вхід CLKL. Вхід SER послідовного введення регістра зсуву є входом пропонованого універсального регістру, а вихід RESULT мультиплексора шин – його виходом $Q []$.

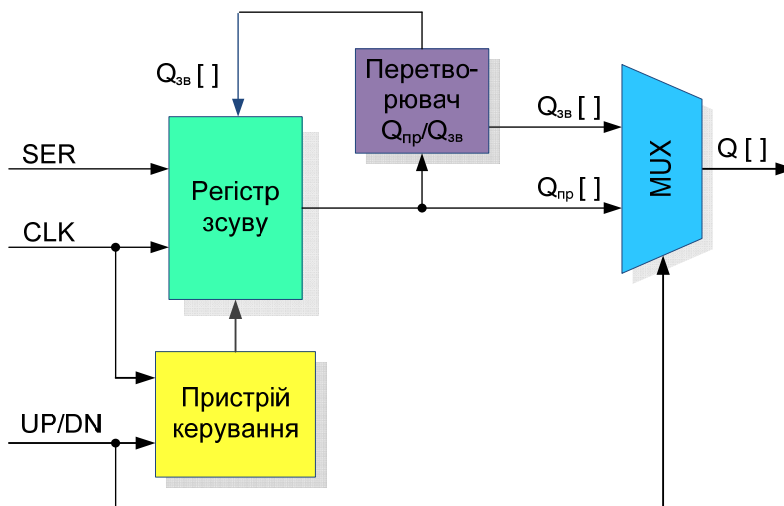


Рис. 1. Універсальний регістр зсуву

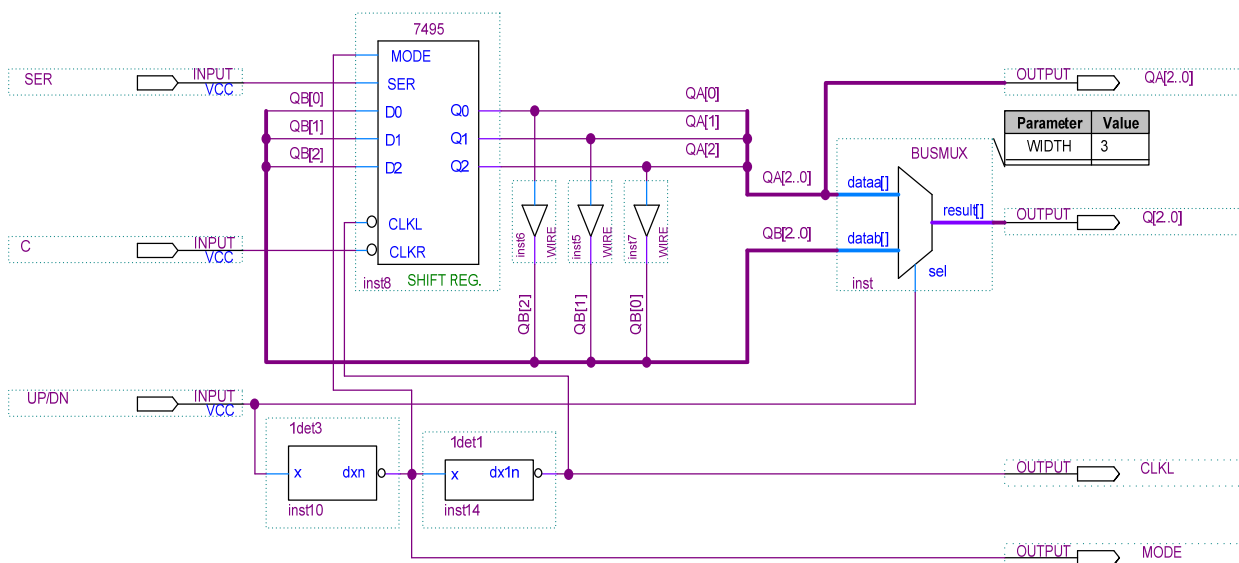


Рис. 2. Схема універсального регістру у САПР Quartus II

Універсальний регістр було реалізовано у програмному забезпеченні САПР Altera Quartus II, схема такого регістру представлена на рис. 2. Altera Quartus II – це система автоматизованого проектування, що

дозволяє розробнику аналізувати, синтезувати і редагувати HDL схеми, реалізовувати пристрої мовами опису апаратного забезпечення VHDL та Verilog, а також дозволяє виконувати моделювання та часовий аналіз.

Універсальний регістр апаратно реалізовано на ПЛІС родини FLEX10K Altera EPF10K70RC240-4. Мультиплексор шин реалізується на мегафункції IC програмованої структури або з'єднанням мультиплексорів IC жорсткої структури. Для прикладу було проведено моделювання трирозрядного регістра зсуву [5].

На рис. 2 видно, що пристрій керування представлений у вигляді двох модулів, які складаються з декількох міжкоміркових буферів ПЛІС, що з'єднані послідовно між собою, причому кількість буферів залежить від розрядності регістра зсуву (рис 3). Чим більша розрядність регістра зсуву, тим більше потрібно буферів для затримки сигналу. Виходи регістра, що утворюють першу шину даних, приєднані до другої шини даних через буфери, для узгодження затримки з сигналом, що утворюється під час перемикавання напрямку зсуву.

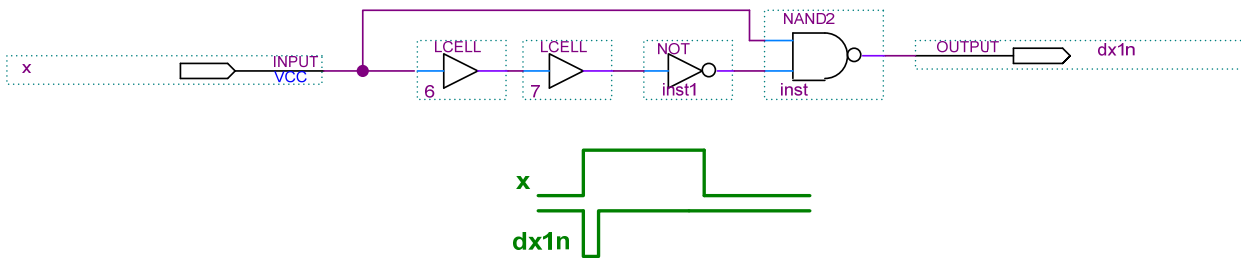


Рис. 3. Пристрій керування на основі елементу I-HE

Основу пристрою керування складають звичайні детектори фронтів, що утворюють імпульси під час перепадів керувального сигналу UP/DN.

Результати моделювання за допомогою САПР Quartus II та експериментальне випробування показано на рис. 4.

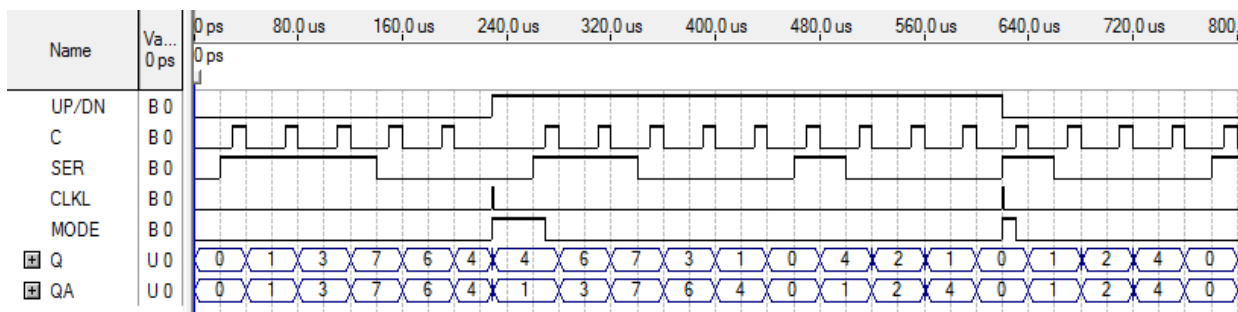


Рис. 4. Часові діаграми роботи пристрою

За результатом моделювання принцип функціонування пристрою можна пояснити за допомогою перемикального графу, що зображений на рис. 5.

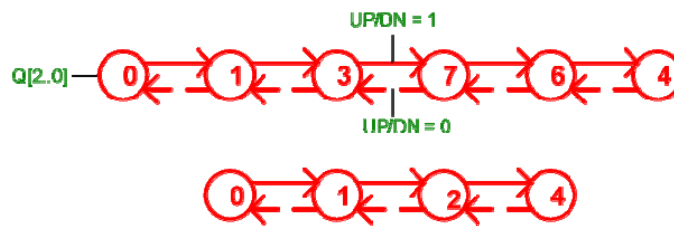


Рис. 5. Перемикальний граф

На перемикальному графі показано трирозрядний код у десятковій системі числення, заповнення регістра зсуву послідовним кодом виконується за час дії n сигналів зсуву на вході синхронізації і наявності відповідних розрядів послідовного коду на послідовному вході, після завершення запису послідовного коду відбувається зсув [6, 7].

Висновки

В результаті було досягнуто поставлену мету – запропонований універсальний регістр на ПЛІС, крім паралельно-послідовного введення-виведення інформації, дозволяє створювати вихідну шину довільної розрядності без зміни вихідного коду в точці реверсу, що розширює функціональні можливості пристрою.

Реалізація його потребує суттєво меншого ресурсу інтегральних мікросхем завдяки використанню в пристрої стандартного регістра без ускладнення його міжрозрядних зв'язків [8].

Література

1. Новиков Ю.В. Основы цифровой схемотехники. Базовые элементы и схемы. Методы проектирования / Юрий Витальевич Новиков. – М. : Мир, 2001. – 379 с.
2. Гаврілов Д. В. Лабораторний практикум з дослідження цифрових пристроїв на основі САПР MAX+PLUS II : навчальний посібник / Дмитро Володимирович Гаврілов, Віктор Леонідович Кофанов, Олександр Володимирович Осадчук. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006. – 200 с.
3. Гаврілов Д. В. Проектування цифрових пристроїв на основі САПР Quartus II : навчальний посібник / Дмитро Володимирович Гаврілов, Віктор Леонідович Кофанов, Олександр Володимирович Осадчук. – Вінниця : ВНТУ, 2009. – 164 с.
4. Зубчук В. И. Справочник по цифровой схемотехнике / Виктор Иванович Зубчук, Виталий Петрович Сигорский, Анатолий Николаевич Шкуро. – К. : Техника, 1990. – 448 с.
5. Пат. 108579 Україна, МПК H03M 13/00, H03M 7/00. Дешифратор семисегментного коду в унітарний / Басич Б. В., Гаврілов Д. В., Белов О. Е., Ситай Ю. В. ; власник Вінницький національний технічний університет. – № u201600023 ; заявл. 04.01.2016 ; опубл. 25.07.2016, бюл. № 14. – 7 с.
6. Гаврілов Д. В. Основи комп'ютерного проектування та моделювання РЕА. Частина 1 : лабораторний практикум / Д. В. Гаврілов, О. В. Осадчук, О. С. Звягін. – Вінниця : ВНТУ, 2015. – 99 с.
7. Гаврілов Д. В. Основи комп'ютерного проектування та моделювання РЕА. Частина 2 : лабораторний практикум / Д. В. Гаврілов, О. С. Звягін, О. В. Осадчук, А. Ю. Савицький. – Вінниця : ВНТУ, 2017. – 104 с.
8. Jubin Mitra An FPGA-Based Phase Measurement System / Jubin Mitra, Tapan K. Nayak // IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems. – 2018. – Vol. 26. – Iss. 1. – P. 133–142. – DOI: 10.1109/TVLSI.2017.2758807.

References

1. Novikov Ju.V. Osnovy cifrovoj shemotehniki. Bazovye elementy i shemy. Metody proektirovanija / Jurij Vital'evich Novikov. – M. : Mir, 2001. – 379 s.
2. Havrilov D. V. Laboratornyi praktykum z doslidzhennia tsyfrovyykh prystroiv na osnovi SAPR MAX+PLUS II : navchalnyi posibnyk / Dmytro Volodymyrovych Havrilov, Viktor Leonidovych Kofanov, Oleksandr Volodymyrovych Osadchuk. – Vinnytsia : UNIVERSUM-Vinnytsia, 2006. – 200 s.
3. Havrilov D. V. Proektuvannia tsyfrovyykh prystroiv na osnovi SAPR Quartus II : navchalnyi posibnyk / Dmytro Volodymyrovych Havrilov, Viktor Leonidovych Kofanov, Oleksandr Volodymyrovych Osadchuk. – Vinnytsia : VNTU, 2009. – 164 s.
4. Zubchuk V. I. Spravochnik po cifrovoj shemotehnike / Viktor Ivanovich Zubchuk, Vitalij Petrovich Sigorskij, Anatolij Nikolaevich Shkuro. – K. : Tjehnika, 1990. – 448 s.
5. Pat. 108579 Ukraina, MPK H03M 13/00, H03M 7/00. Deshyfrator semyseghmentnoho kodu v unitarnyi / Basych B. V., Havrilov D. V., Bielov O. E., Sytai Yu. V. ; vlasnyk Vinnytskyi natsionalnyi tekhnichnyi universytet. – № u201600023 ; zaiavl. 04.01.2016 ; opubl. 25.07.2016, biul. № 14. – 7 s.
6. Havrilov D. V. Osnovy komp'uternoho proektuvannia ta modeliuvannia REA. Chastyna 1 : laboratornyi praktykum / D. V. Havrilov, O. V. Osadchuk, O. S. Zviahin. – Vinnytsia : VNTU, 2015. – 99 s.
7. Havrilov D. V. Osnovy komp'uternoho proektuvannia ta modeliuvannia REA. Chastyna 2 : laboratornyi praktykum / D. V. Havrilov, O. S. Zviahin, O. V. Osadchuk, A. Yu. Savytskyi. – Vinnytsia : VNTU, 2017. – 104 s.
8. Jubin Mitra An FPGA-Based Phase Measurement System / Jubin Mitra, Tapan K. Nayak // IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems. – 2018. – Vol. 26. – Iss. 1. – P. 133–142. – DOI: 10.1109/TVLSI.2017.2758807.

Рецензія/Peer review : 8.2.2019 р. Надрукована/Printed : 10.4.2019 р.
Рецензент: д. т. н., проф. Злепко С. М.

В. А. ДРУЖИНІН, В. О. МІЩЕНКО

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

Ю. М. БОЙКО, О. М. РУБАН

Хмельницький національний університет

РОЛЬ ТА ЗАДАЧІ УПРАВЛІННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЮ МЕРЕЖЕЮ, ПОБУДОВАНОЮ ЗА ДОПОМОГОЮ БЕЗПРОВОДОВИХ РАДІОТЕХНОЛОГІЙ

Проаналізовано задачі, які виконують системи управління інформаційною мережею, визначена роль системи управління в інформаційній мережі, побудованій за допомогою безпроводових технологій. Проаналізовані алгоритми управління інформаційною безпекою та управління продуктивністю мережі. Поставлена задача дослідження. Описано фактори управління інформаційною мережею. Сформовано багаторівневе представлення завдань управління мережею.

Ключові слова: інформаційна мережа, управління інформаційною мережею, безпроводові радіотехнології, управління інформаційною безпекою, управління продуктивністю мережі.

V. A. DRUZHININ, V. O. MISCHENKO

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

J. M. BOIKO, O. M. RUBAN

Khmelnytskyi National University

DIRECTIONS AND TASKS OF INFORMATION MANAGEMENT BY NETWORK BASED ON RADIO TECHNOLOGIES

The tasks that are performed by the information network management systems were reviewed, the role of the management system in the information network that is built using wireless technologies was defined. The algorithms of information security management and network productivity management were analysed. The task of managing the information network should be divided at the level according to the hierarchical organization of the corporate network. The corporate network is constructed hierarchically, reflecting the hierarchy of the enterprise itself and its tasks. The lower level of the network consists of network elements - individual computers, communication devices, data channels. At the next level of the hierarchy, these elements form networks of different scales - the network of the working group, the network of the department, the network of the branch and, finally, the network of the enterprise as a whole. When managing the productivity of external and trunk communication channels, the most preferred is the use of a statistical approach to analysing the loading of information channels. It is based on a much smaller amount of information than is required by mass service theory, since as a research object only the load of the channel itself is taken, which is fixed at certain levels of time intervals. One of the ways to solve this problem is to use intelligent technologies to build an information and analytical system for monitoring information security systems information. The use of intelligent technologies will enable IT security professionals to analyse the processes of functioning of computer systems, to detect hidden semantic dependencies in data, to obtain models that allow estimating and predicting attempts of possible attacks and unauthorized connection in order to prevent them and thus increase the level the security of the computer system as a whole.

Keywords: information network, information network management, wireless radio technologies, information security management, network productivity management.

Вступ. Постановка завдання. Новітні засоби інформаційних послуг, які обумовлені все більшою інтеграцією інформаційних служб, потребують відповідних заходів щодо вдосконалення системи управління інформаційною мережею, у тому числі, побудованою за допомогою безпроводових радіотехнологій.

Розробка сучасних систем управління інформаційними мережами, побудованих за допомогою безпроводових радіотехнологій, є актуальним питанням, але в цьому питанні зроблені лише перші кроки. В Україні помітне суттєве відставання як у теорії, так і у практиці щодо управління інформаційними мережами, побудованими за допомогою безпроводових радіотехнологій, де дуже важливо забезпечити стале управління усіма елементами мережі [1–8].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сьогодні важко знайти якусь галузь в Україні, де була б відсутня комп'ютерна мережа, яка має внутрішні інформаційні й обчислювальні ресурси та вихід до глобальної мережі. Що стосується системного телекомунікаційного оператора України, то роботи зі створення й забезпечення функціонування там інформаційних мереж провадяться вже багато років. Оскільки у теперішній час інформаційні мережі (ІМ) вже побудовані і функціонують, то на перший план виходить розв'язання задач їх гармонійного розвитку й ефективного використання мережевих ресурсів.

Розв'язуються ці задачі за допомогою засобів мережевого управління на базі використання системного підходу, який передбачає побудову цілісної системи управління, що розв'язує усі значимі задачі управління інформаційною мережею і не має слабких місць на окремих ділянках її компонентів.

Розглянемо роль та основні особливості інформаційної мережі, що впливають на побудову комплексної системи мережевого управління – інформаційна мережа системного телекомунікаційного оператора (ІМСТО) України, яка має корпоративну мережу, що об'єднує тисячі робочих станцій користувачів, десятки серверів і розподілена як всередині міст, так і по всій Україні.

Як наслідок, ІМСТО України має складну топологію, де використовуються канали передачі даних різної ємності, вона має вихід до глобальної мережі з використанням багатьох швидкодіючих каналів.

Накопичено великий об'єм різномірних інформаційних ресурсів, що призначений як для внутрішніх, так і для зовнішніх користувачів. ІМСТО України забезпечує розв'язання великого числа задач з використанням різних мережевих застосувань та сервісів. Гостро стоять питання адміністрування різних категорій користувачів, забезпечення механізмів розподілу доступу до ресурсів. Обмежені можливості контролю за діяльністю користувачів, а також використання повністю централізованого механізму мережевого управління. В зв'язку з цим необхідний зважений підхід до модернізації ІМ, що полягає на забезпеченні принципу економічної доцільності та більш ефективного використання наявних програмних та апаратних засобів моделювання та оптимізації.

Основними задачами управління інформаційною мережею є [9]:

- управління безпекою;
- управління продуктивністю;
- облік використання ресурсів;
- управління збоями;
- моніторинг поточного стану ІМ, підтримка прийняття рішень з модернізації та управління

модернізацією;

- моделювання роботи наявних мереж, зокрема аналіз навантаження на окремі її ділянки;
- управління конфігурацією.

Ключовими та першочерговими є розв'язки перших трьох задач: управління безпекою, управління продуктивністю та облік використання ресурсів. Інші задачі можливо розглядати як складові частини попередніх. Наприклад, система управління збоями може бути розглянута як підсистема системи управління безпекою, моделювання – як підсистема управління продуктивністю, а моніторинг необхідний як для розв'язку задач забезпечення продуктивності, так і безпеки.

Визначення факторів управління інформаційною мережею. Управління безпекою. Перш за все, визначимо загрози, які мають місце під час функціонування ІМ. Будь-яке порушення конфіденційності, цілісності, доступності інформаційних ресурсів, що негативно впливає на процес управління ІМСТО, є інцидентом безпеки, який необхідно своєчасно і правильно ідентифікувати з наступною реалізацією заходів для його усунення або зменшення можливої шкоди. Поняття інциденту вводиться міжнародним стандартом ISO/IEC 27001:2005, який узагальнює існуючі рекомендації і положення щодо організаційного забезпечення управління захистом інформаційної системи.

Сформулюємо основні поняття стандарту відповідно до ІМСТО України. Під інцидентом безпеки розуміється одинична подія або низка небажаних, непередбачених подій інформаційної безпеки, внаслідок яких існує велика імовірність компрометації результатів управління ІМСТО. Подія інформаційної безпеки – ідентифікований стан інформаційної мережі, який вказує на порушення політики інформаційної безпеки, відмову засобів захисту або раніше невідому ситуацію, яка може впливати на стан безпеки інформаційних ресурсів структурного підрозділу.

У загальному випадку реалізації інциденту безпеки відповідає певний стан інформаційної мережі, опис якого реєструється технічними засобами захисту. На підставі аналізу досвіду щодо ідентифікації інцидентів накопичується множина описів відомих ситуацій, що можуть бути використані в подальшому.

Необхідність розв'язання практичних задач щодо ідентифікації інцидентів обумовлена вимогами Нормативного документу технічного захисту інформації (НДТЗІ) 1.4–001–2000, який визначає множину функцій осіб зі складу служби захисту інформації [5–7]. Згідно з НДТЗІ можна визначити декілька функцій адміністратора безпеки:

- розслідування випадків порушення політики безпеки, подій безпеки та аналіз причин;
- реєстрація і моніторинг подій безпеки;
- проведення аналітичної оцінки поточного стану безпеки;
- негайне втручання в роботу інформаційної системи у випадку виявлення спроби реалізації

загрози.

Для ефективної діяльності систем безпеки інформації потрібна її безперервна робота, а також всебічний контроль системи, яку потрібно захистити з боку адміністратора. У зв'язку з цим накопичується дуже великий файл з інформацією про діяльність самої системи та її користувачів, який в майбутньому і в найкоротший термін потрібно обробити. З досвіду можна сказати, що об'єм інформації, який потрібно обробити адміністратору безпеки, значно перевищує оптимальний об'єм, який адміністратор в змозі обробити. З цього випливає, що час реакції адміністратора системи безпеки на певну загрозу безпеці системи не дає змоги ефективно реагувати на події, що загрожують безпеці системі. Тобто потрібно автоматизувати рутинні операції обробки великої кількості подій щодо реагування на інциденти.

Методи аналізу інформації, що використовуються в сучасних системах моніторингу даних системи безпеки інформації є достатньо ефективними, якщо відомі точні характеристики подій. У ході дослідження було виявлено, що системи моніторингу даних системи безпеки інформації, наприклад, *IDES*, *IDIOT*, *STAT*, не можуть виявляти невідомі види атак. Всі вони передбачають застосування методів, що пов'язані з використанням статичних шаблонів відомих вторгнень: для виявлення нового виду вторгнення потрібно проінформувати систему про невідомий вид атаки – занести новий шаблон до її внутрішньої бази даних. Це є основним недоліком цих систем тому, що постійне втручання людини в процес виявлення вторгнень не дає бажаної ефективності роботи системи.

Системи моніторингу даних системи безпеки інформації зустрічаються з однаковою проблемою – характеристики атак, що постійно змінюються, потребують гнучкої захисної системи, яка була б спроможна залишатись ефективною, навіть якщо не відомі точні характеристики атаки. Більшість систем моніторингу даних системи безпеки інформації використовують один з підходів до виявлення вторгнень – виявлення аномалій або виявлення зловмисної діяльності користувачів. Оскільки методи, що реалізуються в рамках даних підходів, розраховані на виявлення чітко сформульованих типів атак, такі системи моніторингу даних системи безпеки інформації неодмінно зіштовхнуться з проблемою пропуску атак.

Отже, для ефективної роботи системи безпеки інформації потрібно автоматизувати роботу адміністратора системи безпеки інформації, а також використовувати методи, що давали б змогу реагувати на нові види атак.

Одним із способів розв'язання даної задачі є використання інтелектуальних технологій для побудови інформаційно-аналітичної системи моніторингу даних систем безпеки інформації. Використання інтелектуальних технологій дасть змогу фахівцям з безпеки інформаційних технологій аналізувати процеси функціонування комп'ютерних систем, виявляти приховані семантичні залежності у даних, отримувати моделі, що дозволяють оцінювати та прогнозувати спроби можливих атак та несанкціонованого підключення з метою їх запобігання і, таким чином, підвищити рівень захищеності комп'ютерної системи в цілому.

Інформаційно-аналітичні системи – це системи, що будуються на основі оперативних даних, що були отримані в режимі реального часу з оперативних систем, що автоматизують основні види діяльності організації, а також інших доступних джерел даних, які можуть знадобитися в ході прийняття стратегічних рішень. Базовий комплекс інформаційно-аналітичних систем торкається всієї управлінської вертикалі: звітності відділів та служб, аналізу їх діяльності, фінансово-економічного й стратегічного планування.

Інформаційно-аналітичні системи є надбудовою над уже функціонуючими інформаційними додатками, не роблячи особливого впливу на їхнє функціонування й не вимагаючи їхньої заміни. Ключовою функцією цих систем є акумулювання даних за всіма видами діяльності відділів та служб – від стану складів до фінансової й бухгалтерської звітності.

Побудову системи захисту ІМ необхідно створювати ешелювано, розподіляючи наступні компоненти:

- Захист периметру мережі. Розв'язок цієї задачі забезпечується використанням міжмережевих екранів, які включають такі механізми: трансляція адрес для приховування структури та адресації внутрішньої мережі, фільтрація трафіку, управління списками доступу на маршрутизаторах, протидія атакам на внутрішні ресурси і т. ін.

- Захист серверів (внутрішніх та зовнішніх). Під час захисту поштових серверів обов'язковою вимогою є використання спеціальних антиспамових фільтрів, а також лексичних, репутаційних та сигнатурних аналізаторів. Одним з найпоширеніших у світі серверних спам-фільтрів є Symantec Brightmail Anti-Spam. Існують й інші комерційні фільтри – SpySweeper Enterprise, Cloudmark Immunity, NetIQ MailMarshal, MessageLabs Anti-Spam, Yandex «Спамооборона», Kaspersky Anti-Spam та інші. Рівень фільтрації спаму для цих продуктів коливається від 90% до 98%.

- Захист робочих станцій кінцевих користувачів. Зазвичай, при достатньому приділенні уваги до задач захисту периметру мережі та захисту серверів, забезпеченню захисту кінцевих робочих станцій приділяється мало уваги. Як наслідок, більша частина атак здійснюється як раз з робочих станцій кінцевих користувачів. Цю проблему допомагає вирішити використання персональних брандмаузерів та антивірусного програмного забезпечення. Лідруючі позиції у цьому секторі займають Symantec Norton Internet Security, продукти «Лаборатории Касперского» и Dr. Web.

Управління продуктивністю. Задачі управління продуктивністю можна розподілити на три класи: управління продуктивністю зовнішніх каналів, внутрішніх або локальних каналів, а також мережесервісів. При цьому особливу увагу треба приділити механізмам, націленим на удосконалення методів управління трафіком. Трафік (об'єм завантаження) кожного каналу зв'язку інформаційної мережі є важливим фактичним показником її роботи. Аналіз трафіку дозволяє оцінювати фактичне завантаження мережі і необхідну ємність її каналів, з'ясувати стійкість роботи мережі і оперативність реакції на різні нештатні ситуації, судити про динаміку розвитку мережі і планувати терміни її модернізації.

До базових параметрів функціонування каналів передачі даних відносяться наступні показники, що розглядаються як в цілому, так і в розрізі щодо основних інформаційних сервісів: загальна кількість з'єднань протягом заданого невеликого інтервалу часу, загальний об'єм переданої інформації, загальна кількість переданих пакетів, а також загальний час з'єднань в цьому тимчасовому інтервалі. З тих, що є базовими показниками, легко будуються похідні показники, такі як швидкість передачі даних, обсяг завантаження каналу та ін. Одним з найважливіших показників функціонування інформаційних мереж є швидкість передачі даних кінцевим користувачам. Під цією величиною розуміється відношення кількості переданої інформації (у байтах) до сумарного часу передачі інформації за всіма з'єднаннями за фіксований проміжок часу. Таким чином, йдеться про усереднену швидкість передачі даних кінцевим користувачам за вибраний проміжок часу. Причому усереднювання ведеться не лише за проміжок часу, але і по всіх користувачах, які користувалися мережею в цей проміжок часу. Облік характеристик даної кривої дає мережевому адміністраторові і кінцевим користувачам можливість корегувати мережеву активність з

врахуванням поточного стану. Визначення усередненої швидкості передачі даних набуває особливої значимості, коли необхідно оцінити ефективність вживаних до мережі методів оптимізації трафіку.

Під час управління продуктивністю зовнішніх і магістральних каналів зв'язку найбільш переважним є використання статистичного підходу до аналізу завантаження інформаційних каналів. Він заснований на значно меншій кількості інформації, ніж вимагає теорія масового обслуговування, оскільки в якості об'єкту дослідження береться лише величина завантаження самого каналу, яка фіксується через певні рівні інтервали часу.

Для розв'язання цих завдань розроблена статистична модель внутрішньодобових коливань швидкості передачі даних [10]. Суть моделі полягає в тому, що дані про швидкість передачі, для якої спостерігаються значні коливання в сусідні проміжки часу, усереднюються за визначеним алгоритмом. Отримана в результаті усереднювання функція більш інформативна під час дослідження результатів дії на мережу. Враховуючи, що швидкість передачі даних залежить від активності користувачів, вона є нестационарним тимчасовим рядом, що має різні характеристики залежно від часу доби, дня тижня, місяця. У нашому випадку не має значення динаміка ряду, істотними є такі характеристики, як поведінка процесу протягом доби і часовий тренд.

Як показує аналіз тимчасового ряду швидкості передачі даних, даний ряд має періодичність, і схожі особливості ряду, які повторюються кожні 24 години. Прорахунок сезонної компоненти можна виробляти за однофакторною статистичною моделлю процесу, що описує почасове зміння швидкості передачі даних протягом доби. В якості 24 рівнів чинника в цій моделі необхідно розглядати різні часи доби. В якості оцінки сезонної компоненти в кожен момент часу в адитивній моделі тимчасового ряду можна розглядати середнє арифметичне різниці між середньодобовим значенням швидкості передачі даних і відповідним значенням ряду ковзаючих середніх.

Оскільки при управлінні потужністю зовнішніх каналів адміністратор мережі, як правило, має доступ до каналуутворюючого устаткування лише на одній стороні каналу, то управління може здійснюватись лише шляхом регулювання потоку інформаційних запитів від користувачів до зовнішніх мережевих сервісів. В ході управління продуктивністю локальних каналів можливе також використання статистичного підходу до аналізу, який, з одного боку, може бути джерелом здобуття вихідних даних для імітаційного моделювання, з іншого – для оптимізації управління.

Особливо слід зазначити можливість використання імітаційного моделювання з метою визначення найбільш ефективних дій, що управляють [11].

Облік використання ресурсів. Проблема обліку використання ресурсів Інтернет і контроль за роботою користувачів в мережі стоїть перед кожною організацією. Її вирішення залежить від типу організації, масштабу локальної мережі і кількості користувачів мережі Інтернет. Невеликі організації з декількома десятками користувачів використовують для обліку, в більшості випадків, програмне забезпечення, що вільно розповсюджується, рідше – власні розробки. Завдання системи побудови обліку використання ресурсів зводиться в основному до забезпечення взаєморозрахунків із зовнішніми Інтернет-провайдером і до забезпечення контролю за роботою співробітників організації в мережі.

Найчастіше вживаним рішенням для великих організацій і Інтернет-провайдерів є використання комерційних програмних продуктів, що мають відповідні сертифікати. Ці системи володіють хорошою масштабованістю і гнучкістю, що дозволяє побудувати їх під потреби організації. Функціональність подібних систем розширена за рахунок розвинених підсистем адміністрування користувачів, підсистем фінансового обліку і т. ін.

Проте використання подібних систем у деяких організаціях ускладнене з-за їх високої вартості, а також деяких обмежень, обумовлених строго визначеною моделлю обліку (наприклад, відсутність ієрархії груп користувачів). У цьому випадку доводиться або підлаштовуватись під відповідні обмеження, або займатись доопрацюванням подібних систем. Багато організацій вибирають шлях створення власних систем обліку, що повністю відповідають пред'явленим до них вимогам.

Взаємозв'язок компонентів системи мережевого управління. Зазначимо питання, що стосуються взаємодії компонентів системи мережевого управління, а також переваги, які дає системний і комплексний підхід до її реалізації:

- у всіх підсистемах необхідно використовувати єдину базу даних компонентів ІМ, інформаційних ресурсів і користувачів; це ключові компоненти, без створення яких неможливо вирішити питання створення системи управління ІМ;
- отримання статистичною інформації про поведінку трафіку в системі управління продуктивністю дозволяє виявити аномалії, що може з'явитися наслідком мережевих атак; отже, ефективність системи забезпечення безпеки може значно зрости під час використання подібної інформації;
- зниження продуктивності може бути наслідком надмірного завантаження каналів передачі даних за рахунок різкого збільшення об'єму використання ресурсів; тут очевидна взаємодія системи обліку використання ресурсів і системи управління продуктивністю;
- зниження продуктивності може бути наслідком мережевих атак. В даному випадку відзначимо взаємодію систем забезпечення безпеки і продуктивності;
- користувачі, в результаті аналізу статистики своєї роботи, можуть виявити факти несанкціонованого використання своїх облікових записів. Це зв'язок систем обліку використання ресурсів і

безпеки.

На закінчення необхідно відзначити, що комплексний системний підхід до даної проблеми все ж таки найбільш виправданий і це дозволяє побудувати основні компоненти системи мережевого управління в найкоротші терміни і з мінімальними витратами.

Багаторівневе представлення завдань управління. Завдання управління інформаційною мережею доцільно розділяти на рівні відповідно до ієрархічної організації корпоративної мережі. Корпоративна мережа будується ієрархічно, відображаючи ієрархію самого підприємства і його завдань. Нижній рівень мережі складають елементи мережі – окремі комп'ютери, комунікаційні пристрої, канали передачі даних. На наступному рівні ієрархії ці елементи утворюють мережі різного масштабу – мережа робочої групи, мережа відділу, мережа відділення і, нарешті, мережа підприємства в цілому.

Для побудови інтегрованої системи управління різнорідними елементами мережі природно застосувати багаторівневий ієрархічний підхід. Це, в принципі, стандартний підхід для побудови великої системи будь-якого типу і призначення – від держави до автомобільного заводу. Стосовно систем управління мережами, що найбільш пропрацював і ефективний для створення багаторівневої ієрархічної системи, є стандарт *Telecommunication Management Network (TMN)*, розроблений спільними зусиллями *ITU-T, ISO, ANSI* і *ETSI*. Хоча цей стандарт і призначався спочатку для телекомунікаційних мереж, але орієнтація на використання загальних принципів робить його корисним для побудови будь-якої крупної інтегрованої системи управління мережами. Стандарти *TMN* складаються з великої кількості рекомендацій *ITU-T* (і стандартів інших організацій), але основні принципи моделі *TMN* описані в рекомендації *M.3010*.

Модель *TMN* спрощено можна уявляти у вигляді двомірної діаграми (рис. 1).

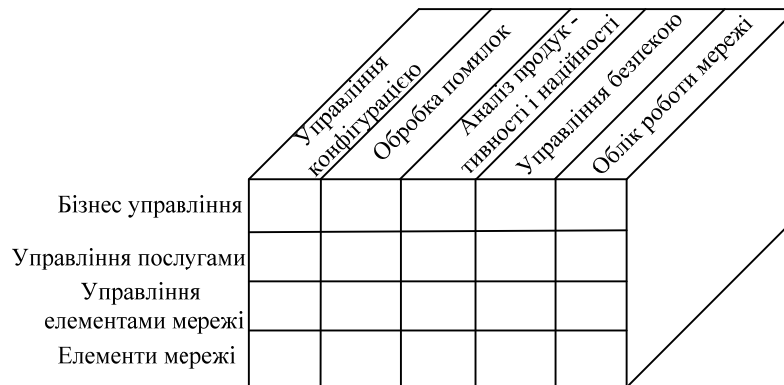


Рис. 1. Багаторівневе представлення завдань управління мережею

Нижній рівень – *рівень елементів мережі (Network Element layer, NE)* – складається з окремих пристроїв мережі: каналів, підсилювачів, кінцевої апаратури, мультиплексорів, комутаторів і тому подібного. Елементи можуть містити вбудовані засоби для підтримки управління – датчики, інтерфейси управління, а можуть і представляти собою засіб, що вимагає для зв'язку з системою управління розробки спеціального устаткування пристроїв зв'язку з об'єктом. Сучасні технології зазвичай мають вбудовані функції управління, які дозволяють виконувати хоч би мінімальні операції з контролю за станом пристрою і за переданим пристроєм трафіком. Подібні функції вбудовані в технології *FDDI, ISDN, frame relay, SDH*. В цьому випадку пристрій завжди можна охопити системою управління, навіть, якщо воно не має спеціального блоку управління, оскільки протокол технології зобов'язує пристрій підтримувати деякі функції управління. Пристрої, які працюють за протоколами, що не мають вбудованих функцій контролю і управління, забезпечуються окремим блоком управління, який підтримує один з двох найбільш поширених протоколів управління, – *SNMP* або *CMIP*. Ці протоколи відносяться до прикладного рівня моделі *OSI*.

Наступний рівень – *рівень управління елементами мережі (network element management layer)* – є елементарними системами управління. Елементарні системи управління автономно управляють окремими елементами мережі, контролюють канал зв'язку *SDH*, управляють комутатором або мультиплексором. Рівень управління елементами ізолює верхні шари системи управління від деталей і особливостей управління конкретним устаткуванням. Цей рівень відповідальний за моделювання поведінки устаткування і функціональних ресурсів мережі. Прикладами таких систем можуть служити системи управління *CiscoView* від *Cisco Systems*, *Optivity* від *Bay Networks*, *RADView* від *RAD Data Communications* і так далі.

Вище лежить рівень управління мережею (*Network management layer*). Цей рівень координує роботу елементарних систем управління, дозволяючи контролювати конфігурацію складених каналів, погоджувати роботу транспортних підмереж різних технологій і тому подібне. За допомогою цього рівня мережа починає працювати як єдине ціле, передаючи дані між своїми абонентами.

Наступний рівень – *рівень управління послугами (Service management layer)* – займається контролем і управлінням за транспортними і інформаційними послугами, які надаються кінцевим користувачам мережі. У завдання цього рівня входить підготовка мережі до надання певної послуги, її активізація, обробка викликів клієнтів. Формування послуги (*service provisioning*) полягає у фіксації в базі даних значень параметрів послуги, наприклад, необхідної середньої пропускнуної спроможності, максимальних величин

затримок пакетів, коефіцієнта готовності і тому подібного. У функції цього рівня входить також видача рівню управління мережею завдання на конфігурацію віртуального або фізичного каналу зв'язку для підтримки послуги.

Рівень бізнес-управління (*Business management layer*) займається питаннями довготривалого планування мережі з урахуванням фінансових аспектів діяльності організації, мережею, що володіє. На цьому рівні щомісячно і поквартально підраховуються доходи від експлуатації мережі і її окремих складових, враховуються витрати на експлуатацію і модернізацію мережі, приймаються рішення про розвиток мережі з урахуванням фінансових можливостей. Рівень бізнес-управління забезпечує для користувачів і постачальників послуг можливість надання додаткових послуг. Цей рівень є окремим випадком рівня автоматизованої системи управління підприємством (АСУП), тоді як всі нижчі рівні відповідають рівням автоматизованої системи управління технологічними процесами (АСУТП), для такого специфічного типу підприємства, як телекомунікаційна [12, 13] або корпоративна мережа. Але, якщо телекомунікаційна мережа дійсно найчастіше є основою телекомунікаційної компанії, то корпоративну мережу і обслуговуючий її персонал зазвичай важко назвати підприємством.

Висновки

1. Для реалізації безпроводових радіотехнологій важливо забезпечити стале управління усіма елементами мережі.

2. На поточний момент реалізація безпроводних технологій пов'язана з розв'язанням задач їх гармонійного розвитку й ефективного використання мережевих ресурсів.

3. Для ефективної роботи системи безпеки інформації потрібно автоматизувати роботу адміністратора системи безпеки інформації, зокрема шляхом використання інтелектуальних технологій для побудови інформаційно-аналітичної системи моніторингу даних.

4. Найважливішим показником функціонування інформаційних мереж є швидкість передачі даних кінцевим користувачам. Під час управління продуктивністю зовнішніх і магістральних каналів зв'язку найбільш переважним є використання статистичного підходу до аналізу завантаження інформаційних каналів.

5. Багато організацій вибирають шлях створення власних систем обліку, що повністю відповідають пред'явленим до них вимогам.

6. Пристрої, які працюють по протоколах, що не мають вбудованих функцій контролю і управління, забезпечуються окремим блоком управління, який підтримує один з двох найбільш поширених протоколів управління, – *SNMP* або *CMIP*.

Література

1. Олифер Н. А. Средства анализа и оптимизации локальных сетей / Н. А. Олифер, В. Г. Олифер. – Центр Информационных Технологий, 1998. – 424 с.
2. Герасимов Б. М. Анализ задач мониторингу информационных сетей та методів підвищення ефективності їх функціонування / Б. М. Герасимов, І. Ю. Субач, П. В. Хусайнов, В. О. Міщенко // Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. – 2008. – № 3 (3). – С. 24–27.
3. Кільчицький С. В. Властивості та критерії оцінювання ефективності сучасної автоматизованої системи управління телекомунікаціями / С. В. Кільчицький // Зв'язок. – 2003. – № 1. – С. 9–12.
4. Бойко Ю. М. Концептуальні особливості реалізації безпроводних сенсорних мереж / Ю. М. Бойко, В. М. Локазюк, В. В. Мішан // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2010. – № 2. – С. 94–98.
5. Герасимов Б. М. Системы поддержки принятия решений: проектирование, применение, оценка эффективности / Б. М. Герасимов, М. М. Дивизинюк, И. Ю. Субач // НАН Украины НИЦ ВС Украины Государственный океанариум, 2004. – 318 с.
6. НД ТЗІ 1.1-002-99. Загальні положення щодо захисту інформації в комп'ютерних системах від несанкціонованого доступу. – [Введ. 28.04.1999]. – К. : ДСТСЗИ СБ України, 1999.
7. НД ТЗІ 1.1-003-99. Термінологія в галузі захисту інформації в комп'ютерних системах від несанкціонованого доступу. – [Введ. 28.04.1999]. – К. : ДСТСЗИ СБ України, 1999.
8. НД ТЗІ 1.4-001-2000. Типове положення про службу захисту інформації в автоматизованій системі. – [Введ. 04.12.2000]. – К. : ДСТСЗИ СБ України, 2000.
9. Замятин В. С. Принципы построения комплексной системы управления информационно-вычислительной сетью ВУЗа / В. С. Замятин // Ползуновский вестник. – 2006. – № 2. – С. 60–67.
10. Замятин В. С. Использование статистического подхода при решении задач анализа и управления компьютерными сетями / В. С. Замятин // Известия АГУ. – 2003. – № 1. – С. 54–57.
11. Данилюк Ю. С. Система моделирования локальных вычислительных сетей / Ю. С. Данилюк, Ф. А. Попов // Изв. АГУ: Спецсборник. – 2002. – С. 63-64.
12. Boiko J. Signal Processing in Telecommunications with Forward Correction of Errors / J. Boiko, O. Eromenko // Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. – 2018. – Vol. 11, nr. 3. – P. 868–877. – DOI: <http://doi.org/10.11591/ijeecs.v11.i3.pp868-877>.
13. Boiko J. Productivity of telecommunication systems with modified signal-code constructions / J. Boiko,

I. Kovtun, S. Petrashchuk // Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T), 2017 4th International. – IEEE, 2017. – C. 173–178. – DOI: 10.1109/INFOCOMMST.2017.8246374.

References

1. Olifer N. A. Sredstva analiza i optimizacii lokal'nyh setej / N. A. Olifer, V. G. Olifer. – Centr Informacionnyh Tehnologij, 1998. – 424 s.
2. Herasymov B. M. Analiz zadach monitorynhu informatsiinykh mrezezh ta metodiv pidvyshchennia efektyvnosti yikh funkcionuvannia / B. M. Herasymov, I. Yu. Subach, P. V. Khusainov, V. O. Mishchenko // Suchasni informatsiini tekhnolohii u sferi bezpeky ta oborony. – 2008. – № 3 (3). – C. 24–27.
3. Kilchytskyi Ye. V. Vlastyvoli ta kryterii otsiniuvannia efektyvnosti suchasnoi avtomatyzovanoi systemy upravlinnia telekomunikatsiinykh / Ye. V. Kilchytskyi // Zviazok. – 2003. – № 1. – S. 9–12.
4. Boiko Yu. M. Kontseptualni osoblyvosti realizatsii bezprovodnykh sensorykh mrezezh / Yu. M. Boiko, V. M. Lokaziuk, V. V. Mishan // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2010. – № 2. – S. 94–98.
5. Gerasimov B. M. Sistemy podderzhki prinjatiji reshenij: proektirovanie, primenenie, oценка jeffektivnosti / B. M. Gerasimov, M. M. Divizinjuk, I. Ju. Subach // NAN Ukrainy NIC VS Ukrainy Gosudarstvennyj okeanarium, 2004. – 318 s.
6. ND TZI 1.1-002-99. Zahalni polozhennia shchodo zakhystu informatsii v kompiuternykh systemakh vid nesanktsionovanoho dostupu. – [Vved. 28.04.1999]. – K. : DSTSZY SB Ukrainy, 1999.
7. ND TZI 1.1-003-99. Terminolohiia v haluzi zakhystu informatsii v kompiuternykh systemakh vid nesanktsionovanoho dostupu. – [Vved. 28.04.1999]. – K. : DSTSZY SB Ukrainy, 1999.
8. ND TZI 1.4-001-2000. Typove polozhennia pro sluzhbu zakhystu informatsii v avtomatyzovani systemi. – [Vved. 04.12.2000]. – K. : DSTSZY SB Ukrainy, 2000.
9. Zamjatin V. S. Principy postroeniia kompleksnoj systemy upravlenija informacionno-vychislitel'noj set'ju VUZa / V. S. Zamjatin // Polzunovskij vestnik. – 2006. – № 2. – C. 60–67.
10. Zamjatin V. S. Ispol'zovanie statisticheskogo podhoda pri reshenii zadach analiza i upravlenija komp'juternymi setjami / V. S. Zamjatin // Izvestija AGU. – 2003. – № 1. – S. 54–57.
11. Daniljuk Ju. S. Sistema modelirovanija lokal'nyh vychislitel'nyh setej / Ju. S. Daniljuk, F. A. Popov // Izv. AGU: Specsbornik. – 2002. – S. 63–64.
12. Boiko J. Signal Processing in Telecommunications with Forward Correction of Errors / J. Boiko, O. Eromenko // Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. – 2018. – Vol. 11, nr. 3. – P. 868–877. – DOI: <http://doi.org/10.11591/ijeecs.v11.i3.pp868-877>.
13. Boiko J. Productivity of telecommunication systems with modified signal-code constructions / J. Boiko, I. Kovtun, S. Petrashchuk // Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T), 2017 4th International. – IEEE, 2017. – S. 173–178. – DOI: 10.1109/INFOCOMMST.2017.8246374.

Рецензія/Peer review : 20.2.2019 р.

Надрукована/Printed : 10.4.2019 р.

Стаття прорецензована редакційною колегією

С. С. ПЕТРОВСЬКИЙ
Хмельницький національний університет

ПОБУДОВА ІНФОРМАЦІЙНОГО СЕРЕДОВИЩА ВНЗ

Розглядається проблема побудови інформаційного середовища ВНЗу. Наводиться опис компонентів середовища і вибір застосовуваних технологій. Запропонована архітектура побудови інфраструктури, що включає такі компоненти, як централізовані термінальні сервери віддаленого завантаження, сервер віртуалізації, термінальні станції-клієнти, єдина платформа побудови інформаційних систем управління організацією, платформа організації веб-конференцій.

Ключові слова: мережеве завантаження, автоматизована система управління, інформаційна система, обчислювальна мережа, товстий і тонкий клієнт, вільне програмне забезпечення, веб-конференції.

S.S. PETROVSKY
Khmelnitskyi National University

BUILDING THE INFORMATION ENVIRONMENT OF THE UNIVERSITY

The problem of creation of the information environment of higher education institution. The description of components of the environment and a choice of the applied technologies is provided. The architecture of creation of the infrastructure, including such components, as the centralized terminal servers of remote loading, virtualization servers, terminal stations and clients, a uniform platform of creation of information management systems of organization, a platform of the organization of web-conferences are offered. Thus, the proposed infrastructure of the organization of information and telecommunication environment allows to use free software as basic elements, minimizing the cost of purchasing licenses. The construction of a computer network fragmented into virtual subnets and the organization of network boot operating systems with centralized management can improve security and significantly reduce the cost of software maintenance throughout the infrastructure, the use of virtualization systems allows for flexible organization of access to the software.

Keywords: network loading, automated control system, information system, computer network, fat and thin client, free software, web-conference.

Постановка проблеми. Ефективне використання інформаційних ресурсів необхідне будь-якій організації. Інформаційні ресурси відображають реальний стан бізнесу, дозволяють сформувати адекватну реакцію на будь-які зміни в бізнесі, а також забезпечити найбільш ефективну взаємодію всіх ресурсів підприємства. Інформація сприяє визначенню конкурентних переваг організації та її стратегічного позиціонування. Нарешті, інформація про стратегічну позицію підприємства на ринку потрібна для побудови ефективної стратегії на основі конкурентних переваг.

Інформаційне середовище підприємства є однією з найважливіших частин інфраструктури та вимагає для свого формування і підтримки певних ресурсів і зусиль, відноситься до числа основних факторів, що визначають якість і успіх організації. Так як головним елементом інформаційного середовища організації є інформація, а основною метою – своєчасне забезпечення працівників необхідною інформацією, потрібна певна систематизація всіх інформаційних ресурсів. Для цього всю інформацію, яка входить в інформаційне середовище організації, доцільно поділити за такими напрямками: зовнішнє оточення; ринок; умови конкуренції; сильні і слабкі сторони підприємства; можливі обставини; минула діяльність; поточні проблеми і можливості; ризик в проведених стратегіях [1–3].

У процесі побудови інформаційно-телекомунікаційного середовища організації необхідно вирішувати низку завдань, пов'язаних з вибором необхідної архітектури обчислювальної мережі, набором інформаційних сервісів, програмного забезпечення і організацією взаємодії між компонентами середовища. При цьому повинен виконуватися ряд критеріїв: гнучка масштабованість, низька вартість супроводу, задоволення вимог інформаційної безпеки, легкість адміністрування та ін. Оптимальним варіантом є застосування відкритих технологій та вільного програмного забезпечення. Однак у більшості випадків це вимагає участі більш кваліфікованих фахівців, на відміну від застосування дорогих комерційних рішень, в яких досягається легкість розгортання. Для спрощення розгортання інформаційно-телекомунікаційного середовища необхідно використовувати такий набір компонентів, який дозволяє здійснювати централізоване управління і при цьому зберігати всі переваги децентралізованої організації побудови інфраструктури: відмовостійкість до виходу з ладу окремих компонентів, зниження навантаження на обчислювальні мережі, гнучке настроювання параметрів і т. д. Разом з тим, інформаційно-телекомунікаційне середовище ВНЗ має задовольняти додаткові умови, пов'язані з організацією навчальної та освітньої діяльності, наявністю великого різноманіття програмного та апаратного забезпечення, а також з великою кількістю потенційних користувачів компонентів середовища [4].

Формулювання цілей статті (постановка завдання) – провести порівняльний аналіз можливостей та послуг програмних продуктів для розробки систем інформаційно-телекомунікаційного середовища ВНЗ.

Виклад основного матеріалу. Умовно пропонуємо інформаційно-телекомунікаційне середовище розділити на кілька функціональних елементів, що вирішують певний спектр завдань: телекомунікаційні сервіси; інформаційні сервіси; програмно-апаратні засоби.

Телекомунікаційні сервіси включають в себе локально-обчислювальну мережу з апаратно-програмними засобами (серверне обладнання, маршрутизатори, комутатори). Основне призначення даних компонентів – це забезпечення єдиного телекомунікаційного простору. Інформаційні сервіси включають в себе програмне забезпечення підтримки навчального та освітнього процесу (спеціалізовані пакети програм), внутрішній і зовнішній портали організації (веб-сайти), корпоративні інформаційні системи, сервіси підтримки відео- і аудіоконференцій та ін. Основне призначення – це забезпечення єдиного інформаційного простору, тобто середовища, в якому користувач отримує необхідну для ефективної роботи інформацію. Програмно-апаратні засоби являють собою набір обладнання (сервери віртуалізації, термінальні станції-клієнти, персональні комп'ютери користувачів, оргтехніка та інше периферійне обладнання), а також програмне забезпечення (операційні системи, системи управління базами даних, системи резервного зберігання, системи адміністрування та централізованого управління та ін.). Основне призначення – це забезпечення єдиної, комплексної інфраструктури для підтримки роботи інформаційних сервісів.

Під час побудови локально-обчислювальної мережі слід використовувати підхід сегментування мережі на окремі віртуальні підмережі. Це підвищує стійкість мережі до потенційних атак і підвищує захищеність інформаційних систем від всіякого шкідливого програмного забезпечення. У разі виходу з ладу ділянки мережі, інші ділянки продовжують працювати, і таким чином досягається відмовостійкість. Проте побудова мережі із застосуванням підходу сегментування вимагає додаткових ресурсів з точки зору супроводу і адміністрування, тому необхідно мінімізувати кількість відмінностей в конфігураційних параметрах компонентів середовища, тобто елементи повинні бути подібні один одному. Це можна зробити застосовуючи централізоване управління, але при цьому забезпечуючи можливість тонкої настройки окремих персональних компонентів і сервісів користувача. Ідеальним рішенням є реалізація технології віддаленого завантаження операційних систем (ОС), що дозволяє адміністраторам повністю контролювати використовується на робочому місці [1]. При цій технології з'являється можливість повністю використовувати обчислювальні ресурси робочої станції як для центрального процесора, так і для графічної підсистеми. Зважаючи повного контролю ПЗ можна реалізувати заходи захисту переданого мережею трафіку і аутентифікації доступу. Однак розміщення всього програмного забезпечення і даних користувачів на мережевих ресурсах значно збільшує мережеве навантаження, тому необхідно розділити за робочими місцями користувачів на кілька шарів:

- Апаратно залежне ПЗ (ядро ОС, мережева підсистема і по графічній підсистемі).
- Шар ПЗ, що виконує ініціалізацію системи і контролює її функціонування.
- Шар прикладного ПЗ користувача, що надається йому з мережевих розподілених ресурсів. Він повинен мати можливість індивідуальної настройки для кожного користувача, включаючи створення індивідуального набору.

В якості ПЗ користувача пропонується використовувати спеціалізовані модулі, побудовані на базі стислої файлової системи squashfs+lzma, що представляють собою перетворені RPM, DEB пакети операційних систем сімейства GNU/Linux. Система будується таким чином, щоб робити підключення модулів «на льоту». В результаті установка ПЗ відрізняється від традиційної тим, що досить просто підключити попередньо налаштоване ПЗ будь-якого дозволеного мережевого протоколу, і воно відразу готове до роботи. Модулі завантажуються шляхом монтування мережевого ресурсу з подальшим монтуванням на loop пристрій. Підтримка ПЗ користувачів здійснюється через централізоване сховище модулів, шляхом своєчасного оновлення та усунення помилок. Зроблені зміни відразу стають доступними всім користувачам системи. Досить просто перепідключити модуль. Це дає можливість повного контролю над тим ПЗ, яке доступно користувачеві, і робить систему дуже гнучкою. Базова частина системи може бути побудована на основі live технології із застосуванням комбінації файлових систем, доступних тільки для читання (squashfs), і файлових систем, розгорнутих в ОЗП (aufs, tmpfs, unionfs і т. д.). Оскільки ПЗ побудовано на основі спеціалізованих модулів і доставляється користувачеві по мережі з інтеграцією в розгорнуту в ОЗП файловою системою, то стають доступні всі апаратні ресурси комп'ютера користувача. Це дає можливість виконувати ресурсомісткі програми. Застосування високошвидкісної файлової системи squashfs+lzma забезпечує приріст продуктивності файлових операцій на 1 Гц процесорі з 1 Гб ОЗП приблизно 1.5–3 рази в порівнянні зі звичайним режимом роботи реального пристрою зберігання (жорсткі диски, флеш-пам'ять та ін.). Таким чином, використання цієї технології є обґрунтованим і забезпечує високу продуктивність. В освітній середовищі використання тільки вільного програмного забезпечення в даний час є проблематичним через великий об'єм напрацьованих навчально-методичного забезпечення, наявності вимог ринку праці до спеціалізованого комерційного ПЗ, тому необхідно мати можливість у запропонованій модульній архітектурі використовувати комерційне ліцензійне ПЗ. Для цієї мети необхідно включити в інформаційно-телекомунікаційне середовище засоби віртуалізації. Це можуть бути кошти повної віртуалізації або контейнерної віртуалізації на рівні однієї операційної системи для цілей ізоляції окремих процесів. Для забезпечення крос-платформного доступу до термінальних рішень на базі віртуалізації бажано мати засоби, що дозволяють здійснювати підключення до термінальних сеансів допомогою веб-технологій. Одним з таких рішень є система побудови віртуальних робочих столів на базі Ulteo OVD. Дане рішення дозволяє здійснювати побудову кластера віртуальних термінальних робочих столів з єдиною авторизацією за допомогою технології Active Directory або LDAP безпосередньо через веб-браузер, що забезпечує високу крос-платформенну доступність сервісу віддаленого робочого столу і може ефективно застосовуватися в

корпоративному освітньому середовищі ВНЗ.

В якості платформи побудови автоматизованих систем управління та корпоративних інформаційних систем дуже важливо мати універсальне засіб дозволяє вести гнучку розробку бізнес-додатків, веб-орієнтованих додатків (веб-портали, веб-сайти тощо). Оскільки освітня середовище – це динамічно розвинуте середовище, то необхідно, щоб вибрані рішення дозволяли гнучко перебудовувати логіку роботи інформаційних систем, бути модульним та при цьому здійснювати взаємодію з іншими сторонніми сервісами. Одним з рішень є використання платформи побудови бізнес додатків, веб-сайтів на основі Odoo (раніше OpenERP). Дана платформа є вільним програмним забезпеченням, а отже не вимагає фінансових витрат на придбання ліцензій та дозволяє легко модифікувати свої компоненти під зростаючі потреби освітньої та навчальної середовища. Модульна архітектура побудови системи дозволяє нарощувати функціональність по мірі виникнення потреби безпосередньо під час роботи системи.

Для організації навчального процесу на сучасному рівні необхідно мати сервіси дистанційного навчання, такі як сервіс підтримки освітніх ресурсів, сервіс веб-конференцій, файлове сховище для документів, відео- та аудіоматеріалів. Для підтримки освітніх ресурсів може бути використана система на базі Moodle. Вона може інтегруватися з множиною інших систем, має модульну організацію і дозволяє розширювати функціональність додатковими плагінами. В якості системи підтримки веб-конференцій пропонується використовувати вільну платформу на базі BigBlueButton. Для організації файлового сховища можна використовувати рішення на базі хмарного сервісу OwnCloud. Це рішення може бути з легкістю розгорнуто на власних серверах організації і, тим самим, забезпечувати безпеку зберігання даних в силу їх локального розміщення. Сервіс дозволяє використовувати клієнти синхронізації під різні операційні системи, а також мобільні платформи, що робить його застосування досить вдалим з точки зору доступності викладачами і студентами [5].

Висновки. Таким чином, запропонована інфраструктура організації інформаційно-телекомунікаційного середовища дозволяє в якості базових елементів використовувати вільне програмне забезпечення, мінімізуючи витрати на придбання ліцензій. Побудова обчислювальної мережі та фрагментованою на віртуальні підмережі і організація мережевої завантаження операційних систем з централізованим управлінням дозволяє підвищити безпеку і значно знизити витрати на супровід програмного забезпечення в рамках всієї інфраструктури, застосування систем віртуалізації дозволяє здійснювати гнучку організацію доступу до комерційного програмного забезпечення, а використання для цього рішення на базі організації віртуальних робочих столів (Ulteo OVD) забезпечити багатоплатформовий доступ до такого програмного забезпечення за допомогою веб-браузера. Побудова корпоративних інформаційних систем на базі єдиної модульної платформи (Odoo) дозволяє досягти комплексної автоматизації із застосуванням сучасних підходів проектування і розробки. Використання в якості платформи для веб-конференцій BigBlueButton, спільно з платформою Moodle надають сервіси дистанційного навчання і підвищують доступність освітньої середовища для широкого кола зацікавлених в процесі навчання людей.

Література

1. Горошкин А. Н. Концепция и технологии построения сетевого уни- верситета / А. Н. Горошкин, М. М. Фисков, А. М. Дербень // Информационные технологии на базе свободного программного обеспечения : материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. – Елец : ЕГУ им. И. А. Бунина, 2010. – С. 49–55.
2. Гольшко А.В. Информационное общество:Тренды и последствия / А.В. Гольшко // Электросвязь. – 2013. – № 4. – С. 4–9.
3. Будко П.А. Управление ресурсами информационно-телекоммуникационных систем. Методы оптимизации / Будко П.А. – СПб : ВАС, 2012. – 512 с.
4. Калинина Л. Содержание и структура курса «Использование Google-сервисов в методической работе учителя» и особенности его реализации в системе повышения квалификации / Л. Калинина, М. Носкова. – 2013. – С. 83–93.
5. Сервіс OwnCloud [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://uk.wikipedia.org/wiki/OwnCloud>

References

1. Goroshkin A. N. Konceptiya i tehnologii postroeniya setevogo uni- versiteta / A. N. Goroshkin, M. M. Fiskov, A. M. Derben' // Informacionnye tehnologii na baze svobodnogo programmnogo obespecheniya : materialy Vseros. nauch.-prakt. konf. s mezhdunar. uchastiem. – Elec : EGU im. I. A. Bunina, 2010. – S. 49–55.
2. Golyshko A.V. Informacionnoe obshhestvo:Trendy i posledstviya / A.V. Golyshko // Jelektrosvjaz'. – 2013. – № 4. – S. 4–9.
3. Budko P.A. Upravlenie resursami informacionno-telekommunikacionnyh sistem. Metody optimizacii / Budko P.A. – SPb : VAS, 2012. – 512 s.
4. Kalinina L. Soderzhanie i struktura kursa «Ispol'zovanie Google-servisov v metodicheskoy rabote uchitelja» i osobennosti ego realizacii v sisteme povysheniya kvalifikacii / L. Kalinina, M. Noskova. – 2013. – S. 83–93.
5. Servis OwnCloud [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu : <https://uk.wikipedia.org/wiki/OwnCloud>

Рецензія/Peer review : 12.2.2019 р.

Надрукована/Printed : 10.4.2019 р.

Рецензент: д. т. н., проф. Сорокатиї Р. В.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ БЕЗПЛОТНИЙ АВІАЦІЙНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ФОТОЗАХОПЛЕННЯ

В роботі опрацювали, виготовили і випробували експериментальний безпілотний авіаційний комплекс з використанням безпілотного літального апарата – гексакоптера з рамою Tarrot 680 і автопілотом Pixhawk PX4 – для фотозахоплення і знешкодження об'єкта. Автопілот Pixhawk володіє відкритим програмним кодом, що дозволило додатково приєднати бортовий комп'ютер Raspberry Pi з власними програмами керування. Стандартні налаштування автопілота змінили для його оптимальної взаємодії з бортовим комп'ютером. Елементи гексакоптера (регулятори моторів, відеокамеру, компас, акселерометр, GPS-приймач і барометр) підібрали і змінили їх вихідні параметри для підвищення надійності роботи комплексу.

Ключові слова: безпілотний авіаційний комплекс, гексакоптер, автопілот, регулятор моторів.

V. CHYHIN, P. MYHAILYSHYN

Land Forces National Academy

EXPERIMENTAL UNMANNED AERIAL COMPLEX FOR PHOTOCAPTURING

In a number of papers of one of authors, the possibility of creating a comprehensive system for the neutralization of another unmanned aircraft is considered. At the first stage of UAV detection, sound devices are used. Then its coordinates, direction and speed are measuring with the help of a stationary video system. Then the flight of own UAV takes place to the extrapolated coordinates of the stranger one. When capturing a UAV, it is chased by a special program installed on the on board computer. In the end, the another unmanned aircraft will be neutralized in a cheaper way, for example, using a grid thrower. Authors did not find in the available literature information about study of such method. Therefore, in this work we worked out and made the model of an unmanned aviation complex with the unmanned aerial vehicle hexacopter on a Tarrot 680 frame. It was used the autopilot Pixhawk PX4 for researching the processes of photo capture and neutralization of the object. Pixhawk has an open code, making it possible to connect an additional board computer Raspberry Pi 3 with own control programs. Standard autopilot settings have been changed for optimal interaction with the on board computer. The unmanned aviation complex, used in experimental studies, includes the base element of the hexacopter, on which the Pixhawk flight controller and the Raspberry Pi on-board computer are installed. Here are fixed the GPS module, six motors and three rechargeable batteries. Key features of Raspberry Pi: A 64-bit quad-core 1.4 GHz processor, dual-band wireless network. It was installed the video camera module Raspberry Pi v2. It has an 8-megapixel sensor Sony Imx219 and supports video modes of 1080p30, 720p60 and VGA90. To control the various flight modes the remote control, laptop and WiFi router were used. Before starting the layout of unmanned aviation complex we pre-tested the setting of all its elements. The connection between the remote control and the hexacopter receiver was set on 2.4 MHz. This allowed for reliable communication at distances of about 300 m. In this case autopilot correctly responded to all commands from the control panel.

Keywords: unmanned aircraft complex, hexacopter, autopilot, motor controller

Постановка проблеми

У ряді робіт одного з авторів [1–3] розглядалася можливість створення наземної установки для виявлення звуковим і фотометадами безпілотного літального апарата (БПЛА) і його знешкодження. При цьому не розглядалося питання виготовлення експериментального безпілотного авіаційного комплексу (БпАК) з використанням безпілотного літального апарата для фотопереслідування і знешкодження іншого БПЛА. Автори не виявили в наявній літературі інформації про виготовлення та дослідження БпАК для такої мети.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

В українських публікаціях описуються, в основному, безпілотні літальні апарати літакового типу, які використовуються, зокрема, для проведення розвідки. Так, у праці [4] вказується на невідповідність сучасним вимогам і стандартам, що пред'являються до зразків озброєння та військової техніки, оперативно-тактичного безпілотного авіаційного комплексу ВР-3 “Рейс” і стратегічного безпілотного авіаційного комплексу ВР-2 “Стриж”, що знаходяться на озброєнні Збройних Сил України. Запропоновано кілька шляхів оснащення ЗСУ сучасними БпАК. Автори не розглядають питання використання безпілотних літальних апаратів типу мультикоптери. У праці [5] ґрунтовно проаналізовано можливості застосування безпілотних літальних апаратів різних типів для військових цілей, зокрема, для аерофотознімання і розвідки, вказано на необхідність виділення великих фінансів для забезпечення ними Збройних Сил України. Автор [6] навів характеристики безпілотних літальних апаратів вітчизняного та закордонного виробництва, оцінив нові засоби моніторингу і контролю надзвичайних ситуацій, при цьому звернув увагу на БПЛА українського виробництва типу трикоптер моделі “Viper SM 3”. Для моніторингу теплових мереж та ЛЕП рекомендується [7] використання безпілотних авіаційних комплексів літакового та мультироторного типу. Для тепловізійної зйомки опор ЛЕП доцільне використання БПЛА типу мультикоптерів.

До роботи, яка за суттю є близькою до нашої, можна віднести [8] “Розробка систем стабілізації польоту квадрокоптера”. Однак, автор лише вводить загальні поняття про такі складові елементи квадрокоптера, як акселерометр, гіроскоп, барометр, контролер польоту, GPS-навігатор та компас. Але робота не торкається практичного налаштування системи стабілізації польоту. На сайті виробника контролера польоту Pixhawk та його програмного забезпечення [9] можна знайти окремі інструкції щодо

відлагодження БПЛА і систем його керування.

Виходячи з наведеного, прийшли до висновку, що для експериментальних досліджень системи керування безпілотним літальним апаратом під час фотозахоплення, фотопереслідування і знешкодження БПЛА противника слід виготовити гексакоптер з наявних у продажі складових, зокрема, з використанням відкритого для під'єднання до додаткового бортового комп'ютера контролера польоту типу Pixhawk. Потужність гексакоптера є суттєво вищою у порівнянні з потужностями типових квадрокоптерів, зокрема, марки DJI (Фантом-3 і т.п.), для перенесення сіткостріла, виконаного із сталевих деталей.

Мета роботи. Метою роботи є створити макет безпілотного авіаційного комплексу на базі гексакоптера (БПЛА) і наземної станції (пульта керування, ноутбука і бездротової системи зв'язку), при цьому гексакоптер виготовити на рамі Tarrot-680, використати автопілот (контролер польоту) PixHawk PX4, бортовий комп'ютер (БК) Raspberry Pi з відеокамерою Raspberry Pi V2.

Виклад основного матеріалу

Контролер польоту – автопілот. Контролер польоту призначений для задання положення тіла БПЛА у просторі та стабілізації польоту відносно горизонту. Сучасні контролери оснащені набором



Рис. 1. Фото автопілота Pixhawk PX4

1 – до бортового комп'ютера, 2 – до кнопки безпеки, 3 – до акумулятора, 4 – до зумера, 5 – до GPS модуля, 6 – до компаса

мініатюрних інтегральних сенсорів, які безперервно відстежують стан коптера у просторі, вимірюють вплив на нього кутових прискорень, вітру, атмосферного тиску і напрямку силових ліній магнітного поля. На гексакоптері встановили досить потужний контролер польоту Pixhawk PX4 (рис. 1, рис. 5). Він створений на базі оригінальної плати з 32-бітним процесором та сучасною оперативною системою, яка забезпечує швидке та надійне опрацювання даних [10]. Pixhawk має систему з відкритим програмним кодом, що дозволило додатково приєднати бортовий комп'ютер із спеціальними програмами (у нашому випадку – програми фотозахоплення, фотопереслідування і виконання дії знешкодження).

У ролі **бортового комп'ютера** використали плату Raspberry Pi [11] (рис. 2, рис. 5). Основні технічні характеристики Raspberry Pi: 64-розрядний чотирьохядерний процесор з тактовою частотою 1,4 ГГц, дводіапазонна бездротова мережа, підтримка Bluetooth 4.2/BLE, швидка мережа Ethernet і підтримка Power-over-Ethernet з окремим каналом PoE NAT.

Модуль відеокамери Raspberry Pi v2 встановили на БК (рис. 3). Він має 8-мегапіксельний сенсор Sony IMX219 [12]. Він підтримує відеорежими 1080p30, 720p60 і VGA90. Модуль приєднується через 15-сантиметровий стрічковий кабель до порта CSI на комп'ютері Raspberry Pi.

Модуль GPS-сенсора і компаса. На гексакоптері встановили GPS-модуль Ublox-neo-m8n, об'єднаний з компасом HMC5883L [13] (рис. 5). Цей GPS-модуль є одним з найшвидших і точних GPS модулів. Відмінно підходить для стабільних, точних і швидких польотів по карті. Підходить для контролера польотів Pixhawk. Його особливості: швидкий пошук супутників (10 секунд на пошук 6 супутників); похибка вимірювання координат - до 0,6 метра; вбудований компас HMC5883L з частотою оновлення 160 Гц; підтримує різні системи координат: GPS + BD + SBAS, або GPS + GLONASS+SBAS.

Барометр використовується для отримання даних про тиск, за якими автопілот визначає свою висоту над рівнем моря або над рівнем рельєфу місцевості. У контролері Pixhawk встановлений барометр



Рис. 2. Фото бортового комп'ютера Raspberry Pi
1 – слот карти пам'яті, 2 – процесор, 3 – до живлення, 4 – до монітора, 5 – GPIO, 6 – USB



Рис. 3. Фото модуля відеокамери Raspberry Pi v2

MEAS MS5611.



Рис. 4. Фото пульта керування
1 – лівий джойстик, 2 – правий джойстик, 3 –
перемикачі режимів, 4 – дисплей

Регулятори швидкості обертання двигунів.

Використали регулятори Hobbywing XRotor 40A APAC Brushless ESC 2-6S швидкості обертання безколекторних двигунів SUNNYSKY V2814-11 800KV Outrunner Brushless Motor [14] (рис. 5). Вони призначені для перетворення сигналів від польотного контролера у силовий струм, який забезпечує потрібну швидкість обертання двигуна. Мають такі характеристики: робочий струм 40 А, максимальний струм 60 А, маса 26 грам.

Джерело живлення. Всі елементи комплексу використовують електричне живлення. Для підвищення часу польоту БПЛА вибрали сучасне джерело живлення з високою електроємністю і порівняно малою масою. У системі використали 3 літєво-полімерні акумуляторні батареї типу Multistar фірми Turnigy ємністю 5200 мА·год (рис. 5). Автопілот Pixhawk не має у своїй конструкції приладів для вимірювання рівня заряду акумуляторної батареї. Тому встановили спеціальний вольтметр Power

module, який висвітлював на моніторі рівень заряду.

Пульт керування коптером. Для ручного керування польотами гексакоптера використали багатофункціональний пульт Turnigy 9X pro [15] (рис. 4). У порівнянні з іншими аналогами цей пульт керування характеризується високою якістю виготовлення і надійністю при експлуатації.

Макет безпілотного авіаційного комплексу. На рисунку 5 зображена повна схема макета БПАК, використаного при експериментальних дослідженнях. Базовим елементом є гексакоптер 1, на якому встановлений контролер польоту Pixhawk 8, бортовий комп'ютер Raspberry Pi 7, закріплено GPS-модуль 1, шість моторів 9 і три акумуляторні батареї 5. Для керування в різних режимах польотів використовували

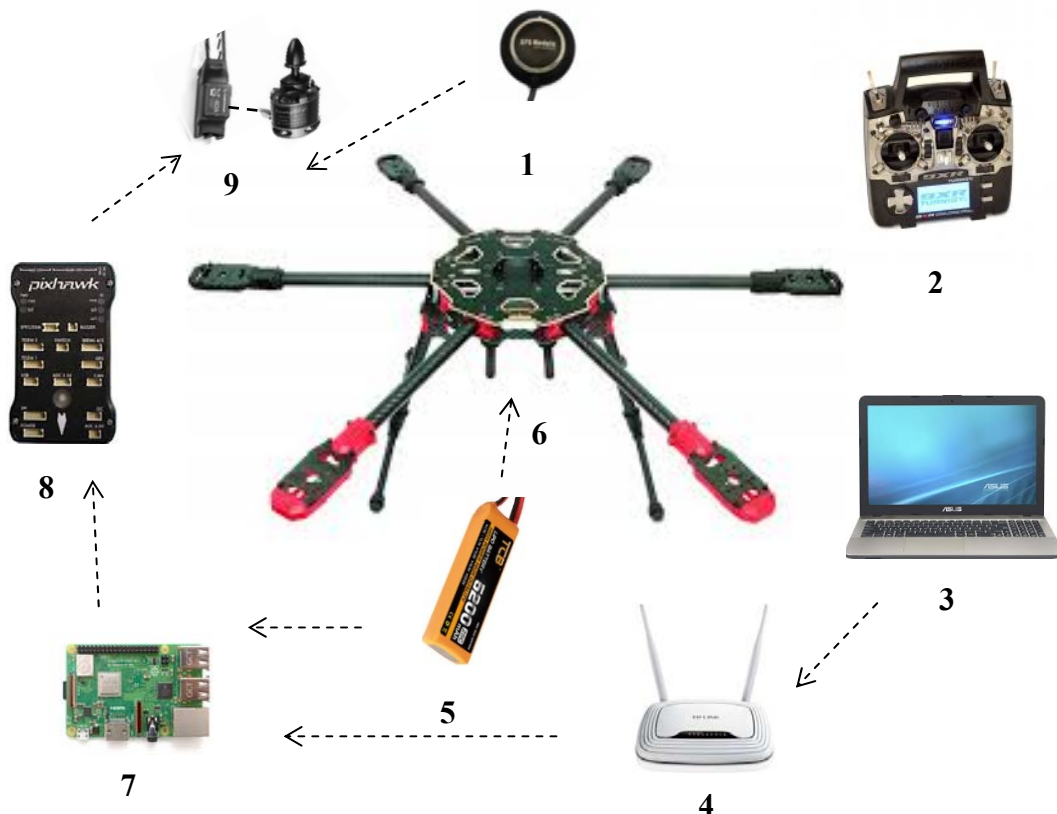


Рис. 5. Схема макета безпілотного авіаційного комплексу:
1 – GPS модуль, 2 – пульт керування, 3 – ноутбук, 4 – WiFi роутер, 5 – акумуляторна батарея,
6 – рама гексакоптера, 7 – бортовий комп'ютер, 8 – автопілот, 9 – мотор і регулятор обертів

пульт керування 2, ноутбук 3 і WiFi роутер 4.

Первинна перевірка роботи комплексу. Перед пуском макета безпілотного авіаційного комплексу (рис. 5) попередньо перевіряли налаштування усіх його елементів. Зв'язок між пультом керування і приймачем на гексакоптері радіосигналів від пульта налаштували на частоту 2,4 МГц, що дало можливість надійного зв'язку на відстанях порядку 300 м. При цьому автопілот коректно реагував на всі команди від

пульта керування.

Перевіряли наявність сигналів від не менше шести супутників для надійного позиціонування на карті. При пуску гексакоптера відбувався рівномірний рух вгору, а також стійке зависання у повітрі. Це свідчило про синхронність роботи моторів, а отже, про правильність автоматичного налаштування регуляторів швидкості обертання моторів. Перевірили працездатність та налаштування сенсорів коптера у відповідних режимах польотів – Stability, AltHold, Sport та інших. Виявили, що сенсори здатні забезпечити надійні польоти у всіх протестованих режимах. Для перевірки узгодженості роботи комплексу встановили зв'язок між автопілотом Pixhawk та бортовим комп'ютером Raspberry Pi. За допомогою власної програми, встановленої на БК, переконалися, що два пристрої (автопілот і комп'ютер) працюють узгоджено. Це свідчить про можливість експериментальних досліджень процесів фотозахоплення, фотопереслідування і знешкодження з використанням власних програм.

Висновки

Створений макет безпілотного літального комплексу на базі гексакоптера з рамою Tarot 680 з використанням автопілота Pixhawk PX4 та бортового комп'ютера Raspberry Pi для експериментальних досліджень процесів фотозахоплення, фотопереслідування і знешкодження з використанням власних програм.

Елементи гексакоптера (регулятори моторів, відеокамеру, компас, акселерометр, GPS-приймач і барометр) підібрали і змінили вихідні параметри для підвищення надійності роботи комплексу.

Література

1. Федішин Н. Система виявлення і супроводження літальних об'єктів з використанням звукової і фотоапаратури / Н. Федішин, В. Чигінь // Матеріали всеукр. наук.-техн. конф. "Актуальні проблеми проектування, виготовлення і експлуатації озброєння та військової техніки". – Вінниця, 2017. – С. 309–311.
2. Федішин Н. Дослідження звукової системи виявлення літальних об'єктів з використанням гармонік в акустичному сигналі / Назар Федішин, Василь Чигінь // Матеріали міжнар. конф. молодих вчених та аспірантів "IEF-2017". – Ужгород, 2017. – С. 13–15.
3. Чигінь В. І. Вимірювання координат безпілотних літальних об'єктів з використанням звукової і відеоапаратури / В. І. Чигінь, П. Я. Михайлишин // Матеріали V Всеукраїн. наук.-техн. конф. у царині метрології "Technical Using of Measurement – 2019". – Славське, 2019. – С. 10–12.
4. Сальник Ю. П. Сучасний стан оснащення Збройних сил України безпілотними авіаційними комплексами / Ю. П. Сальник, І. В. Матала, В. А. Онищенко // Збірн. наук. праць Харківського універс. Повітряних Сил. – 2011. – Вип. 2(28). – С. 46–51.
5. Глотов В. Аналіз можливостей застосування безпілотних літальних апаратів для військових цілей / В. Глотов, А. Гуніна, Ю. Телешук // Фотограмметрія, геоінформаційні системи та картографія. – 2017. – Вип. 1 (33). – С. 139–146.
6. Лаврівський М. Розвиток безпілотних літальних апаратів в Україні та світі для виконання завдань цивільного захисту / М. З. Лаврівський // Науковий вісник НЛТУ України. – 2017. – Т. 27, № 1. – С. 151–153.
7. Бабак В. Моніторинг об'єктів теплоенергетики з використанням безпілотних літальних апаратів / В. П. Бабак // Пром. Теплотехніка. – 2017. – Т. 39, № 2. – С. 25–30.
8. Крошка О. С. Розробка системи стабілізації польоту квадрокоптера: магістерська робота, Запорізький націон. техн. універс. / О. С. Крошка. – Запоріжжя, 2017. – 84 с.
9. ArduPilot [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://ardupilot.org/ardupilot/>
10. Pixhawk [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://pixhawk.org/>
11. Raspberrypi Pi [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.raspberrypi.org>
12. Camera Module V2 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.raspberrypi.org/products/camera-module-v2/>
13. Arduino.UA [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://arduino.ua/prod1152-gps-modul-ublox-neo-m8n-s-kompassom>
14. Регулятор безколекторний hobbypower 30a [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://hobbymania.com.ua/tovar.php?id_tovar=2814
15. Turnigy Power Systems [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.turnigy.com/radios/>

References

1. Fedyshyn N. System of detection and escorting of flying objects with the use of sound and photographic equipment / Fedyshyn N., Chyhin V. // Actual problems of designing, manufacturing and exploitation of armaments and military equipment: materials of all countries. Sci.-Tech. Conf. Vinnytsya, - 2017. - p. 309 - 311.
2. Fedyshyn Nazar. Investigation of sound system for detecting flying objects using harmonics in an acoustic signal / Fedyshyn Nazar, Chyhin Vasyil // Internat. conf. Young Scientists and Postgraduates "IEF-2017". Uzhhorod, - 2017. - p. 13 - 15.
3. Chyhin V.I. Measurement of coordinates of unmanned aerial vehicles using sound and video equipment / Chyhin V.I., Mykhailishyn P.Ya. // 5th Ukrainian science-techn. conf. in the field of metrology "Technical Use of Measurement - 2019". Slavske, - 2019, p. 10 - 12.

4. Salnik Yu.P. Current state of equipping the Armed Forces of Ukraine with unmanned aviation complexes / Yu.P. Salnik, I. V Matala, V. A. Onishchenko // Science works of Air Forces Kharkiv University. - 2011. - issue 2 (28). - p. 46 - 51.

5. Glotov V. Analysis of possibilities of using unmanned aerial vehicles for military purposes / V. Glotov, A. Gunina, Yu. Teleshchuk // Photogrammetry, geoinformation systems and cartography. – 2017. - issue 1 (33). - p. 139 - 146.

6. Lavrovsky M. Development of unmanned aerial vehicles in Ukraine and the world for civil defence tasks / M.Z. Lavrovsky // Scientific Herald of NLTU of Ukraine. – 2017. – vol. 27, No.1. - p. 151 - 153.

7. Babak V. Monitoring of thermal power engineering objects using unmanned aerial vehicles / V.P. Babak // Heat Industry Engineering. – 2017. - vol. 39, No. 2. - p. 25 – 30.

8. Kroshka O. Development of quadcopter flight stabilization system: master thesis, Zaporizhzhia Nation. Techn. University / O. S. Kroshka. – Zaporizhzhia, 2017. - 84 p.

9. ArduPilot. URL: <http://ardupilot.org/ardupilot/>

10. Pixhawk. URL: <https://pixhawk.org/>

11. Raspberrypi Pi. URL: <https://www.raspberrypi.org>

12. Camera Module V2. URL: <https://www.raspberrypi.org/products/camera-module-v2/>

13. Arduino.UA. URL: <https://arduino.ua/prod1152-gps-modyl-ublox-neo-m8n-s-kompasom>

14. Free charge regulator hobby power 30a. URL: https://hobbymania.com.ua/tovar.php?id_tovar=2814

15. Turnigy Power Systems. URL: <http://www.turnigy.com/radios/>

Рецензія/Peer review : 17.3.2019 р.

Надрукована/Printed :10.4.2019 р.

Рецензент: д. фіз.-мат. н., проф. Малинич С. З.

ОБМІН ПРАКТИЧНИМ ДОСВІДОМ, ТЕХНОЛОГІЯМИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

DOI 10.31891/2307-5732-2019-271-2-207-211
УДК 624.012.45.04

Е. А. ЯРЕМЕНКО

Одесская государственная академия строительства и архитектуры

Н. А. ЯРЕМЕНКО

Одесский национальный морской университет

РАСЧЕТ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КЕССОННЫХ ПЕРЕКРЫТИЙ

Одними из наиболее распространенных элементов различных зданий и сооружений являются плоские железобетонные перекрытия. В современном строительстве применяют в основном сборные и сборно-монолитные перекрытия. Они отличаются высокой индустриальностью. В работе представлен результат расчета кессонного перекрытия с ребрами, которые расположены в двух направлениях. При расчете учитывается физическая нелинейность. Характеристики исследуемой модели даны в статье. Расчет перекрытия произведен при помощи компьютерной программы, которая численно реализует задачи расчета железобетонных ростверков на основе пространственной расчетной схемы с учетом физической нелинейности. На основе полученных результатов проанализировано напряженно-деформированное состояние железобетонного кессонного перекрытия в упругой стадии работы и при наличии трещин.

Ключевые слова: перекрытие, кессон, предварительное напряжение, балочный ростверк, перекрестная система.

H. A. YAREMENKO

Odessa State Academy of Construction and Architecture

N. A. YAREMENKO

Odessa National Maritime University

CALCULATION OF REINFORCED CONCRETE CASSON FLOORS

One of the most common elements of various buildings and structures are flat reinforced concrete floors. In modern construction mainly used prefabricated and precast-monolithic floors. They are highly industrialized. Considered in the work of the system of cross beams, made of reinforced concrete, are flat ribbed, coffered floor. One of the current trends is the assessment of the stress - strain state and the carrying capacity of the cross beams and their systems. The aim of the work is to use a software package created for the implementation of the calculation and, as a consequence, the study of the stress-strain state of the systems of cross beams made of reinforced concrete. The paper presents the result of the calculation of the caisson overlap with the ribs, which are located in two directions. The calculation takes into account the physical nonlinearity of the material. The ribs are located in two directions. Thus, free architectural planning becomes possible, which in turn makes it possible to use the structure for various planning decisions. Characteristics and drawing of the studied model are given in the article. The overlap was calculated using a computer program that numerically implements the tasks of calculating reinforced concrete grillages on the basis of a spatial design scheme taking into account physical nonlinearity. On the basis of the obtained results, the stress - strain state of reinforced concrete decompression in the elastic stage of work and in the presence of cracks is analysed. In the vicinity of middle columns, there is an increase in bending moments and shear forces. Their magnitude is greater than the magnitude of the corresponding efforts in a continuous beam imitating the columnar overlap. The formation of cracks leads to an increase in deflections, a decrease in transverse forces and bending moments in the model under study. In the strip above the column, in the longitudinal row of columns, the forces fall much less than in the cross-section bands of the overlap.

Keywords: overlap, caisson, prestressing, beam grillage, cross system.

Введение

В статье рассмотрены системы перекрестных балок, изготовленные из железобетона. Они представляют собой плоские ребристые, кессонные перекрытия. Также рассматривают пролеты автодорожных мостов. Достаточно большая стоимость таких сооружений, а также налагаемая ответственность, говорят о том, как важно обеспечить надежность подобных конструкций. Актуальная оценка напряженно-деформированного состояния и несущей способности перекрестных балок и их систем важна, поскольку при их эксплуатации возникают дефекты, повреждения как следствие увеличения нагрузок.

Постановка задачи

Целью работы является использование программного комплекса, созданного для реализации расчета и, как следствие, изучение напряженно-деформированного состояния систем перекрестных балок из железобетона.

Анализ исследований и публикаций

Напряженно-деформированное состояние и несущая способность балок и систем перекрестных балок – кессонных перекрытий – является предметом постоянных исследований. В свете чего идея применения классических методов строительной механики для расчета железобетонных ростверков очевидна [1–3]. Однако прикладных работ, учитывающих современные достижения по описанию особенностей деформирования железобетона, и направленных на решение задачи расчета напряженно-деформированного состояния и несущей способности железобетонных балок и систем перекрестных балок, которые ориентированы на реализацию с помощью программного комплекса, практически нет.

Выделение нерешенных частей проблемы

Расширение и применение программных комплексов, учитывающих новые методы и алгоритмы для проведения расчетов напряженно-деформированного состояния и несущей способности железобетонных балок и систем перекрестных балок является актуальным направлением работы. Эти программные комплексы, реализующие расчетные задачи, обязаны полностью отражать пространственный характер работы железобетонных конструкций, повреждения элементов конструкций, а также учитывать нелинейный характер деформирования материалов. Для реализации такого алгоритма авторами разработана компьютерная программа RUSZT-KRSSON [4], написанная на языке Delphi.

Результаты исследований

Для проведения расчета рассмотрено кессонное перекрытие. Ребра расположены в двух направлениях. Таким образом, возможной становится свободная архитектурная планировка, что в свою очередь дает возможность использовать конструкцию для различных планировочных решений. Ребра кессонных перекрытий образуют клетки квадратной формы. Расстояния между осями от 60 до 120 см (рис. 1) [1, 3].

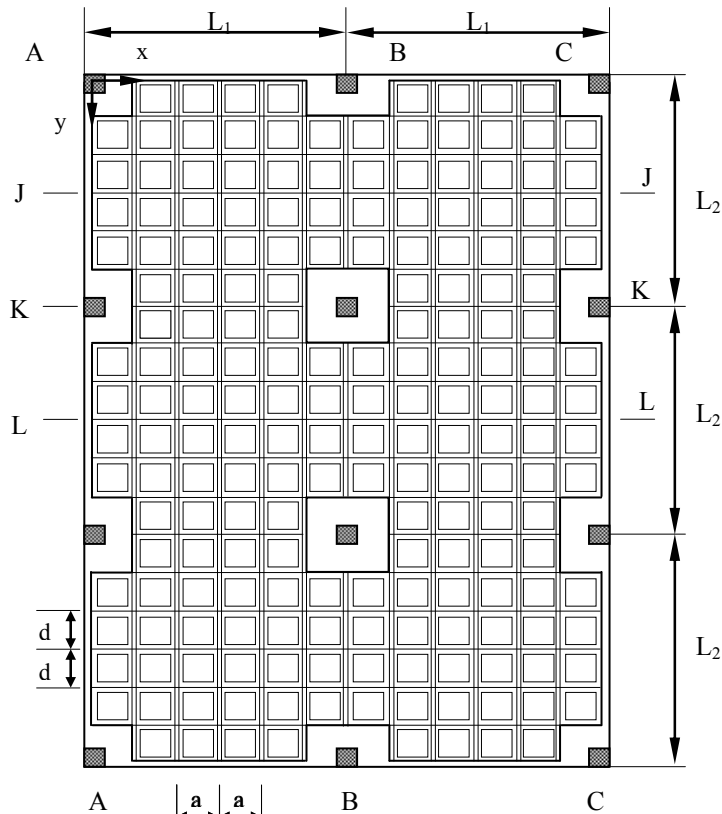


Рис. 1. Схема перекрытия

Нижний край кессонного перекрытия имеет ширину ребра от 12 см до 15 см. Верхний край ребра уширяется до 20–25 см. Затем он переходит в плиту кессонного перекрытия. Как правило, толщина плиты кессона, от 4 см до 10 см. Полная высота такого перекрытия $L/30$ и более. Тут L – максимальное расстояние, между установленными колоннами. При нагрузке в пределах до 4 кН/м^2 полная высота находится в границах $(1/25 - 1/28)L$. Расстояние между осями колонн, как правило, составляет 4,8–12 м. При использовании различных расстояний между осями колонн, выбирают кессоны с наиболее подходящей высотой ребра (рис. 2, табл. 1).

Таблица 1

Характеристики кессонных перекрытий

Тип кессона h , см	Толщина плиты (наименьшая) h_{II} , см	Пролет L , м		
		Временная нагрузка, кН/м^2		
		4	6	8
20	4	6,0	5,4	4,8
25	5	7,2	6,6	6,0
30	6	8,4	7,8	7,2
40	8	12,0	10,0	8,0

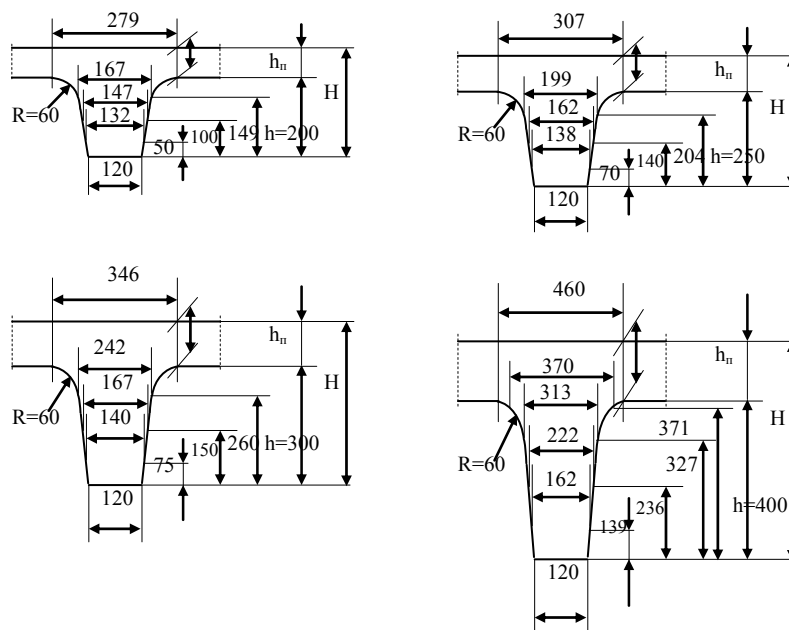


Рис. 2. Типы кессона

Инвентарную опалубку часто изготавливают из пластмассы (полипропилен и др.). Она удобна для перестановки и многократного использования.

При конструировании кессона в зоне расположения колонны устраивают скрытую капитель, толщина которой равняется общей высоте кессонного перекрытия.

В зоне капители вместо пластмассовой опалубочной формы ставят горизонтальную пластину. Размеры капители зависят от расстояния между колоннами, нагрузки и высоты сечения перекрытия. Она предназначена для восприятия среза в окрестности колонны, где возникает максимальная поперечная сила. Также обеспечивает восприятие отрицательного изгибающего момента в надколонной полосе, создающего сжатие в нижней зоне сечения.

Скрытая капитель обеспечивает условия для конструктивного армирования ребер хомутами, либо даже отказа от поставки хомутов. Указания на минимальные размеры капителей для кессонов размером 80 см приведены в табл. 2.

Таблица 2

Размеры капителей для кессонов 80 см

Расстояние между колоннами L , м	Минимальное количество узлов на одну капитель
$L \leq 4,8$	≤ 8
$4,8 < L \leq 7,2$	$8 \div 12$
$7,2 < L \leq 9,6$	$12 \div 16$
$9,6 < L \leq 12$	$16 \div 20$
$12 < L \leq 14$	$20 \div 24$

Минимальное сечение железобетонных колонн – 30x30 см, но не меньше $L/15$. Возможно также использование стальных колонн, но тогда в капители применяется крестообразные стальные консоли, приваренные к колонне. Главное преимущество таких конструкций состоит в их пространственной работе, что обеспечивает экономию бетона и арматуры. Эквивалентная средняя толщина бетона, вложенного в кессонное перекрытие в среднем на 45% меньше, по сравнению с гладкой плитой толщиной, равной высоте кессона. Анализ напряженно-деформированного состояния с учетом нелинейности выполнен при помощи программы RUSZT-KESSON [4], позволяющей рассчитывать перекрестные системы кессонных перекрытий.

Жесткость сечения перекрытия на участках без трещин определяется по формуле, согласно действующих норм. Жесткость сечений перекрытия на участках с трещинами определяется по формуле, предложенной профессором Прокоповичем И.Е. [5, 6].

Сопротивление перекрытия кручению не учитывается, поскольку крутящие моменты в перекрестных системах на порядок меньше, чем изгибающие [7].

А. Параметры системы перекрестных балок: m – количество поперечных балок 17 шт., n – количество продольных балок 13 шт., d – расстояние между поперечными балками 0,8 м, a – расстояние между продольными балками – 0,8 м, $L_1 = L_2 = 4,8$ м.

В. Параметры сечений: h – высота продольных и поперечных балок 0,3 м, b – ширина стенки продольных и поперечных балок 0,15 м, h_f – высота полки продольных балок 0,05 м, b_f – ширина полки 0,3 м, A_s, A_s' – площадь сечений нижней и верхней арматуры 2,26 см², a_s, a_s' – защитный слой нижней и верхней арматуры 0,015 м.

С. Характеристики материалов: E_b – начальный модуль упругости бетона, 26500 МПа, R_b – сопротивление бетона сжатию 15 МПа, R_{bt} – сопротивление бетона растяжению 1,4 МПа, E_s – модуль упругости арматуры 209000 МПа, R_s – сопротивление арматуры растяжению 335 МПа.

Д. Полная нагрузка – 10 Кн/м².

Изгибающий момент при образовании трещин $M_{cr} = 6,27$ кНм. Предельный изгибающий момент $M_u = 49,7$ кНм.

Эпюры прогибов, изгибающих моментов и поперечных сил для нескольких сечений перекрытия приведены на рис. 3. Сплошные линии – «упругий» расчет (итерация 0). Пунктирные линии – расчет с учетом трещин (итерация 5).

Отметим всплески изгибающих моментов и поперечных сил, возникающие в окрестности средних колонн. Их величина больше чем величина соответствующих усилий в неразрезной балке, имитирующей надколонную полосу перекрытия.

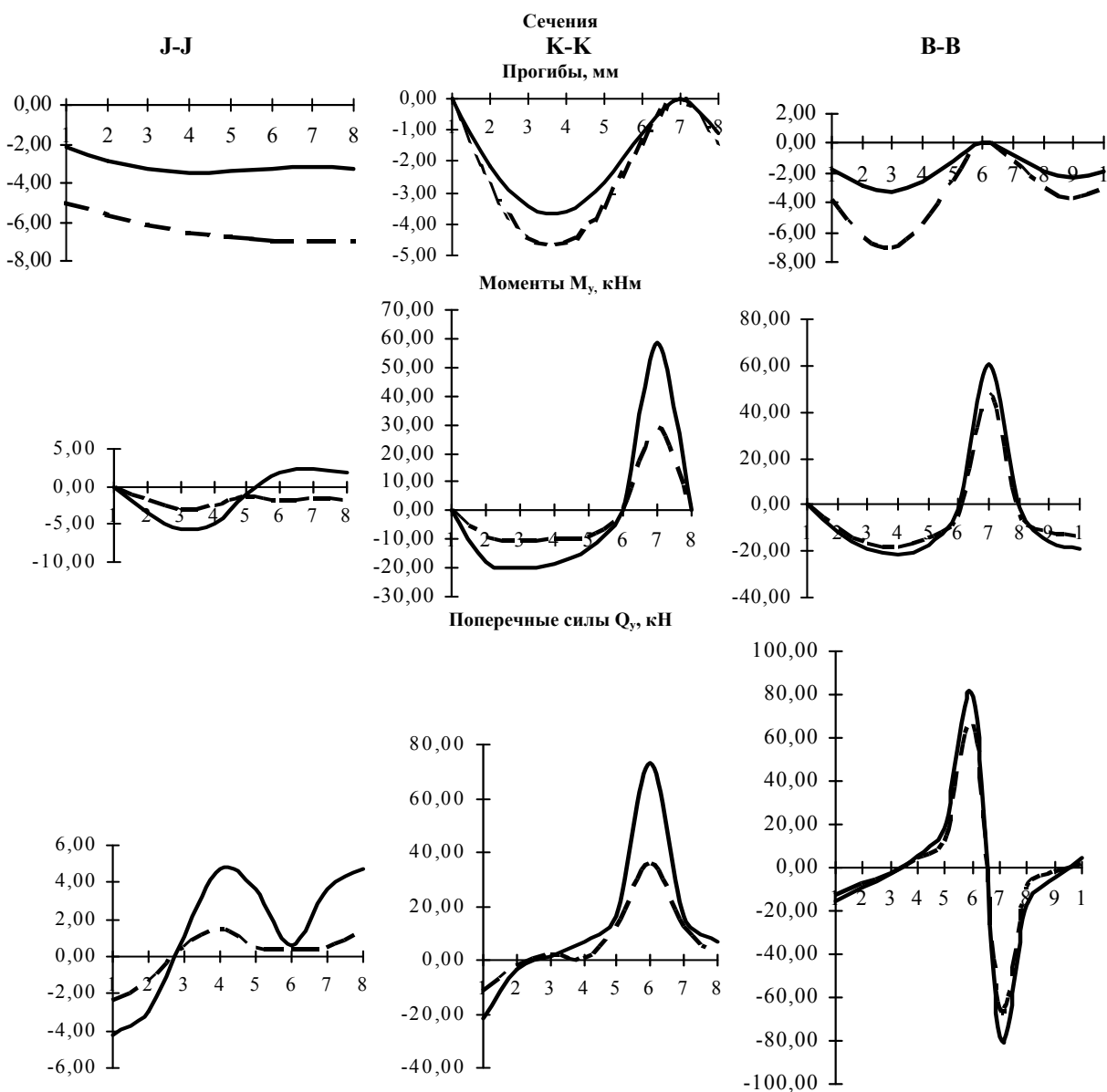


Рис. 3. Эпюры

Выводы

В зоне средних колонн появляется концентрация усилий. Трещинообразование приводит к увеличению прогибов. Изгибающие моменты и поперечные силы уменьшаются. В надколонной полосе

продольного ряда колонн усилия падают существенно меньше (порядка 20%) чем в полосах поперечных сечений перекрытия.

Литература

1. Димитров Б. Стоманобетонни конструкции / Димитров Б. – София : Техника, 1987. – 286 с.
2. Маноилов Л. Исследование кессонных перекрытий / Л. Маноилов, Н. Игнатиев, Б. Димитров и др. // Годишник на ВИАС. – София. – Стоманобетонни конструкции. 1983–1984. – Том XXXI, СВИТЪК IX. – С. 9–22.
3. Марков Т. Экспериментальные исследования кессонных перекрытий под длительной нагрузкой / Т. Марков, Н. Игнатиев, Б. Димитров и др. // Годишник на ВИАС, том XXXI, СВИТЪК IX. – София. – Стоманобетонни конструкции. 1983–1984. – С. 23–29.
4. Филин О.В. Напряженно-деформированное состояние предварительно напряженных пролетных строений железобетонных мостов / О.В. Филин, Е.А. Яременко, Н.А. Яременко // Ресурсоэкономные материалы, конструкции, здания и сооружения. – Ровно 2005. – Вып. 12. – С. 330–338.
5. Прокопович И.Е. Прикладная теория ползучести / И.Е. Прокопович, В.А. Зедгендзе. – М. : Стройиздат, 1980. – 240 с.
6. Прокопович И.Е. Практические рекомендации по расчету потерь предварительного напряжения и перемещений железобетонных пролетных строений мостов / И.Е. Прокопович, Е.Н. Щербakov, М.В. Штейнберг, В.А. Завалин – М. : Транспортное строительство, 1978. – № 7. – С. 10–14.
7. Яременко Н.А. О расчете балочных ростверков методом перемещений / Н.А. Яременко // Вестник ОНМУ. – Одесса 2005. – Вып. 16. – С. 173–188.
8. Surianinov M. Calculation of plate-beam systems by method of boundary elements / M. Surianinov, O. Shylyiaiev // International Journal of Engineering & Technology. – 2018. – № 7 (2.23). – P. 238–241.

Referenses

1. Dimitrov B. The Stoman-concrete construction / Dimitrov B. – Sofia: “Technique”, 1987. – 286 p.
2. Manoilov L. Investigation of caisson floors / L. Manoilov, N. Ignatiev, B. Dimitrov, etc. // The Godish Book on VIAS, vol. XXXI, SWITK IX. – Sophia. – Steman-concrete construction. 1983–1984. – p. 9–22.
3. Markov T. Experimental studies of caisson floors under long-term load. / T. Markov, N. Ignatiev, B. Dimitrov, etc. // Godishnik on VIAS, vol. XXXI, SVITK IX. – Sophia. – Steman-concrete construction. 1983–1984. – p. 23–29.
4. Filin O.V. The stress-strain state of prestressed spans of reinforced concrete bridges / O.V. Filin, E.A. Yaremenko, N.A. Yaremenko // Resource-saving materials, structures, buildings and structures. – Exactly 2005. – Vol. 12 – p. 3030–338.
5. Prokopovich I.E. Applied theory of creep / I.E. Prokopovich, V.A. Zedgenidze – Moscow: Stroyizdat, 1980. – 240 p.
6. Prokopovich I.E. Practical recommendations on the calculation of the prestress losses and displacements of reinforced concrete span structures of bridges / I.E. Prokopovich, E.N. Scherbakov, M.V. Steinberg, V.A. Zavalin – M.: Transport construction, 1978. – № 7 – p. 10–14.
7. Yaremenko N.A. On the calculation of beam grillages by the displacement method / N.A. Yaremenko // Bulletin of ONMU. – Odessa 2005. – Vol. 16 – p. 173–188.
8. Surianinov M. Calculation of plate-beam systems by method of boundary elements / M. Surianinov, O. Shylyiaiev // International Journal of Engineering & Technology. – 2018. – № 7 (2.23). – P. 238–241.

Рецензія/Peer review : 5.2.2019 р. Надрукована/Printed : 10.4.2019 р.
Рецензент: д. т. Н., проф. Сур`янінов М. Г.

С. А. БУРЛАКА, В. В. ЯВДИК, А. П. ЄЛЕНИЧ
Вінницький національний аграрний університет

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА СПОСОБИ ОЦІНКИ ВПЛИВУ ПАЛИВ З ВІДНОВЛЮВАНИХ РЕСУРСІВ НА РОБОТУ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГУНА

У даній статті розглядаються основні напрямки досліджень та результати, отримані в ході використання біопалива з ріпакової олії в дизельних двигунах. Наводяться дані щодо впливу різних способів поліпшення економічності. Розглянуто способи інтенсифікації згоряння під час застосування чистої ріпакової олії в якості палива. Наведено результати оптичного дослідження паливного факела. Проведені експериментальні роботи, що дозволяють оцінити особливості дизельного двигуна під час використання біопалива – контрольні показники роботи двигуна, тиск та параметри подачі палива (тиск і підйом голки розпилювача форсунки), а також показники шкідливих викидів (окислів азоту NO_x , окису вуглецю CO і твердих частинок C). У процесі аналізу були досліджені способи використання біопалива. Також проведені спеціальні дослідження, що дозволяють оцінити процеси, що відбуваються при роботі на паливах з іншими фізико-хімічними властивостями. Найбільш простим способом є використання чистої ріпакової олії в якості палива. В ході досліджень реєструвалися головним чином кількість палива, що впорскується в камеру згоряння та його теплотворна здатність. Були приведені в норму штатні регулювання та комплектація двигуна для його роботи на стандартному нафтовому дизпаливі. В ході проведення експерименту і обробки отримані дані, на підставі яких проведено порівняльний аналіз робочого процесу двигуна з використанням двох видів палива.

Ключові слова: біопаливо, дизельний двигун, ефективні показники, екологічність, робочий процес, сумішоутворення.

S. A., BURLAKA V. V. YAVDYK, A. P. YELENICH
Vinnytsia National Agrarian University

METHODS OF RESEARCH AND METHOD OF EVALUATION OF FUEL EFFECTS OF RESTORED RESOURCES ON THE WORK OF DIESEL ENGINES

This article discusses the main areas of research and the results obtained using biofuels from rapeseed oil in diesel engines. Provides data on the impact of various ways to improve efficiency. The methods of intensification of combustion with the use of pure rapeseed oil as fuel are considered. The results of the optical research of the fuel torch are given. Experimental work has been carried out to evaluate the features of a diesel engine using biofuels - engine performance indicators, pressure and fuel supply parameters (pressure and lift of the nozzle atomizer needle), as well as indicators of harmful emissions (nitrogen oxides NO_x , carbon monoxide CO and particulate matter C). In the process of analysis, the above-mentioned methods of using biofuels were investigated. Also, special studies have been carried out to evaluate the processes occurring when working on fuels with other physicochemical properties. The easiest way is to use pure rapeseed oil as fuel. In the course of the research, the amount of fuel injected into the combustion chamber and its calorific value was recorded. Normal standard adjustments and complete sets of the engine for its work on the standard petrol diesel were standardized. During the experiment and processing, the data were obtained, on the basis of which a comparative analysis of the working process of the engine using two types of fuel was carried out.

Key words: biofuel, diesel engine, effective indicators, ecological compatibility, working process, mix formation.

Вступ

В останні роки тема виробництва палива з поновлюваних джерел, в першу чергу з рослинної, придбала популярність та актуальність, що не викликає сумнівів. Це особливо характерно для тих країн, економіка яких залежна від імпорту вуглеводнів та продуктів їх переробки. Саме в цих регіонах ідея про те, що біоетанол і біодизель можуть потіснити традиційні види палив, вельми популярна. Тому на міждержавному рівні прийнято рішення, починаючи з 2009 року, що всі країни ЄС зобов'язані випускати і споживати біодизельне паливо. Уряди цих країн надають виробникам біопалива різні пільги [1, 2]. Річні темпи виробництва біопалива складають 25...35%. Єврокомісія пропонує до 2020 р. подвоїти частку біопалива в структурі споживання бензину на території країн ЄС до 10%.

Останнім часом на перший план вийшли аргументи про необхідність зменшення економічної залежності від імпорту нафти та газу за допомогою розгортання широкомасштабного виробництва біопалива.

Підхід до розвитку біопаливної енергетики для країн ЄС та України кардинально різняться, адже ЄС отримали державну підтримку, що дало потужний імпульс їхньому розвитку.

На сьогоднішній день виготовлення біопалива ведеться в 28 країнах, серед яких Японія, Німеччина та Франція є найбільшими світовими виробниками. Європейським лідером з виробництва біодизеля є Німеччина. Виробництво і споживання біопалива в країнах Євросоюзу регламентовано законодавством. Директива 2003/30/ЄС Європейського парламенту та Ради ЄС від 8 травня 2003 року щодо ширшого використання біологічного та інших видів палива з відновлюваної сировини чітко визначає мінімальний рівень біопалива на заправках [3].

Перспектива використання біопалива в якості добавок до автомобільного палива в Україні поки туманна. За чинними вимогами їх вміст не повинен перевищувати для етанолу більше 5%, для метанолу – більше 3% [4].

В результаті вищенаведених причин для країн ЄС, США характерно створення великих і середніх підприємств для виробництва біопалива, підкріплене законодавчою підтримкою держави та відповідними фінансовими ресурсами як для виробника, так і для споживача біопалива.

В Україні проблеми виробництва біопалива перекладаються на адміністрації регіонів і місцевих виробників. Тому немає відповідної законодавчої бази, а залучені фінанси незначні. В результаті створюються підприємства або малопотужні підприємства з недосконалою технологією для забезпечення одного чи декількох господарств орієнтованих для виробництва біопалива на експорт. Тому для країн ЄС, США характерно, перш за все, виробництво біодизеля та біоетанолу, які в подальшому передаються на нафтопереробні підприємства, де з їх допомогою виробляють товарні палива для двигунів з іскровим запалюванням – E10, E15, E85; для дизельних двигунів – B5, B10, B20 [5].

Для українських підприємств головні завдання – зменшення вартості палив та зниження залежності від поставок нафтопродуктів. У зв'язку з цим вибираються інші технології отримання готових продуктів з використанням біопалива. Причому виробництво та використання біоетанолу в Україні обкладається великими акцизними зборами, тому його використання обмежена дослідницькими цілями, а будуються підприємства, орієнтовані на експорт.

Найбільш поширеним типом двигунів сільськогосподарського призначення є дизельні двигуни (транспортні, тракторні, комбайнові, технологічні тощо). Відповідно, в більшій мірі, розвивається отримання біопалива для дизельних двигунів.

Для кліматичних умов України найбільш перспективною з економічної точки зору є застосування ріпакової олії. При середній врожайності ріпаку 18 центнерів з гектара та отриманні з 1 т насіння близько 340 кг олії з 1 га можна отримати 600 кг біодизеля, що дозволить обробити 10 га ріллі [6].

Фермери та сільськогосподарські організації виявляють особливий інтерес до застосування чистої ріпакової олії в якості палива, оскільки собівартість отримання ріпакової олії в 2-3 рази менше вартості нафтового палива, однак відмінності фізико-хімічних показників створюють ряд проблем під час експлуатації двигуна.

Фізико-хімічні характеристики ріпакової олії та дизельного палива наведені в таблиці 1. Вона має більш високу кінематичну в'язкість в порівнянні з дизельним паливом (ДП), яка становить 30,7 мм²/с при 40 °С (для ДП – від 3 до 6 мм²/с при 20 °С). Внаслідок цього при низьких температурах виникають проблеми, пов'язані з подачею рапсової олії до ПНВТ [7].

Мета і задачі роботи

Метою наукових досліджень була модифікація конструктивних заходів та рекомендацій для застосовування біопалива з максимальною ефективністю.

Аналіз останніх досліджень

Ріпакова олія – продукт широкого використання в натуральному вигляді на харчові цілі, а для технічних цілей – від використання в якості вихідного матеріалу для хімічного синтезу – для застосування у вигляді мастильних засобів та перспективного виду біопалива для дизельних двигунів. Традиційна технологія виробництва біодизеля заснована на обробці рослинних олій (ріпакової, соєвої, соняшникової тощо) спиртами в присутності лужних каталізаторів. Продуктами реакції є ефіри жирних кислот (власне біодизель) та гліцерин [8, 9].

На даний час в Україні та за кордоном крім застосування чистого біодизельного палива розглядаються практичні аспекти використання в дизельних двигунах біопалива з рослинної сировини наступних видів [10]:

- Натуральна ріпакова олія (в чистому вигляді). Дослідження показали, що внаслідок відмінності фізико-хімічних характеристик в порівнянні з нафтовими паливами вона має погіршені властивості, тому для її використання необхідне конструктивне удосконалення дизельного двигуна.

- Біопаливо з суміші ріпакової олії з дизельним паливом в різних пропорціях. Даний спосіб найменш витратний з економічної точки зору, дозволяє використовувати біопаливо, обходячись тільки регулюванням двигуна. Однак даний спосіб погіршує економічні та екологічні характеристики двигуна.

- Застосування чистого біодизеля, а також різних сумішей на основі нафтового дизельного палива, рапсової олії, біодизеля та біоетанолу. Даний спосіб дозволяє отримати задовільні економічні та екологічні показники роботи стандартного дизельного двигуна. До недоліків відноситься підвищена вартість отримання даного виду палива.

Кожна група з представлених способів має свої переваги і недоліки, які необхідно враховувати під час вибору енергетичної стратегії конкретного регіону, враховуючи і те, що кращих результатів можна досягти тільки при комплексному підході до вирішення енергетичної проблеми, використовуючи всі можливі ресурси, які є рентабельними.

Виклад основного матеріалу

Для оцінки теплотворної здатності палива використовують нижчу теплоту згоряння, яка для рапсової олії складає 37000 кДж/кг, тоді як для дизельного палива цей показник дорівнює 42500 кДж/кг. Пояснюється це вмістом в олії 11% кисню, який практично повністю відсутній в ДП [11]. Внаслідок цього відбувається зниження потужності через зменшення теплового змісту циклової порції, яка частково компенсується більшою щільністю олії по відношенню до традиційного палива.

Фізико-хімічні показники палив [12]

Показники	Дизельне паливо	Ріпакова олія
Цетанове число	45	40
Фракційний склад:		
10% переганяється, при °С	197	311
50% переганяється, при °С	245	329
90% переганяється, при °С	328	341
Кінематична в'язкість, мм ² /с;		
при 20 °С		76,0
при 60 °С	4,58	19,7
при 100 °С		8,04
Температура застигання, °С	-10	-23
Густина, кг/м ³ при 20 °С	833,2	917,4
Температура спалаху, °С	40	Більше 100
Нижча теплота згорання, МДж / кг	42,7	37

Зі збільшенням густини палива відбувається більш ранній початок подачі палива, а при підвищеній в'язкості збільшується тривалість впорскування, зменшується витік палива через зазори, що призводить до збільшення циклової порції палива [13]. Ця різниця буде вищою при підвищенні частоти обертання колінчастого валу двигуна. В'язкість та щільність палива також мають значний вплив на процеси розпилення та сумішоутворення. Чим вища в'язкість та щільність, тим більш дисперсні виходять краплі при розпилюванні і тим більш далекобійним буде струмінь палива. При цьому погіршується якість розпилення та випаровування, наслідком чого є неповне згорання та утворення нагару. На першому етапі досліджень не проводилося жодних оптимізаційних заходів для роботи двигуна на ріпаковій олії. Отримані дані за економічністю та шкідливими викидами наведені на рисунках 1 і 2.

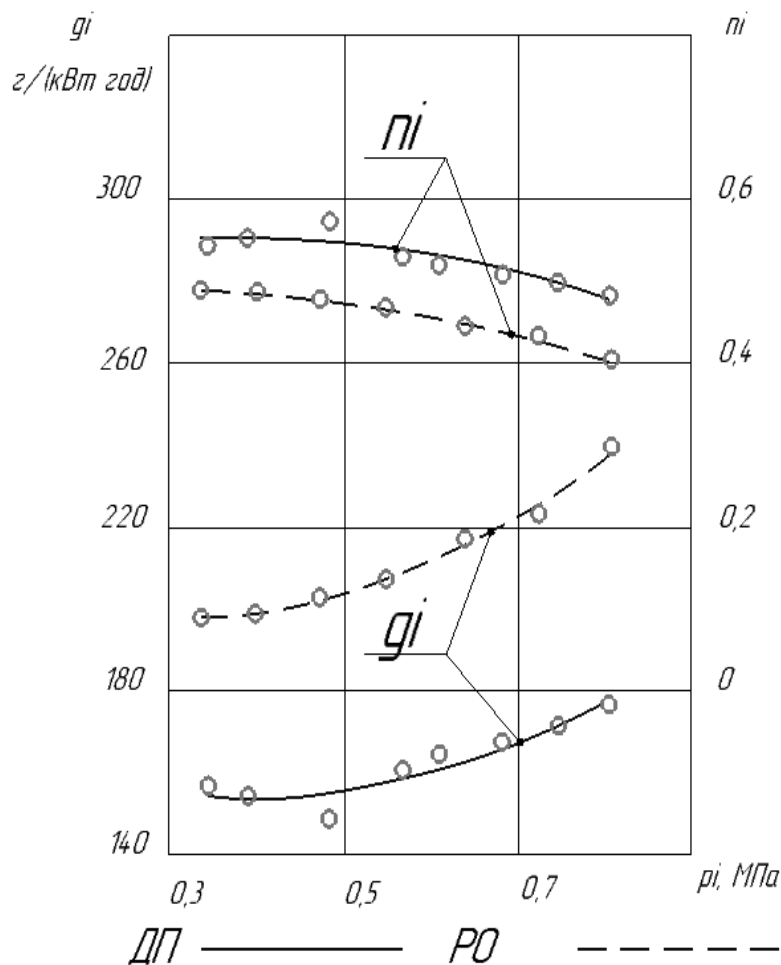


Рис. 1. Параметри економічності роботи двигуна при роботі на різних видах палива

При роботі на звичайному дизельному двигуні отримані наступні результати:

- робочий процес на ріпаковій олії має нижчі економічні показники через більшу тривалість

процесу згоряння;

- для ріпакової олії поліпшуються екологічні показники: зменшується вміст твердих частинок С та оксидів азоту NO_x , збільшуються викиди оксиду вуглецю CO .

За результатами досліджень був зроблений висновок про необхідність покращення показників робочого процесу.

Для поліпшення показників необхідне забезпечення підготовки палива; забезпечення необхідних параметрів подачі палива для здійснення ефективного сумішоутворення; організація процесу згоряння.

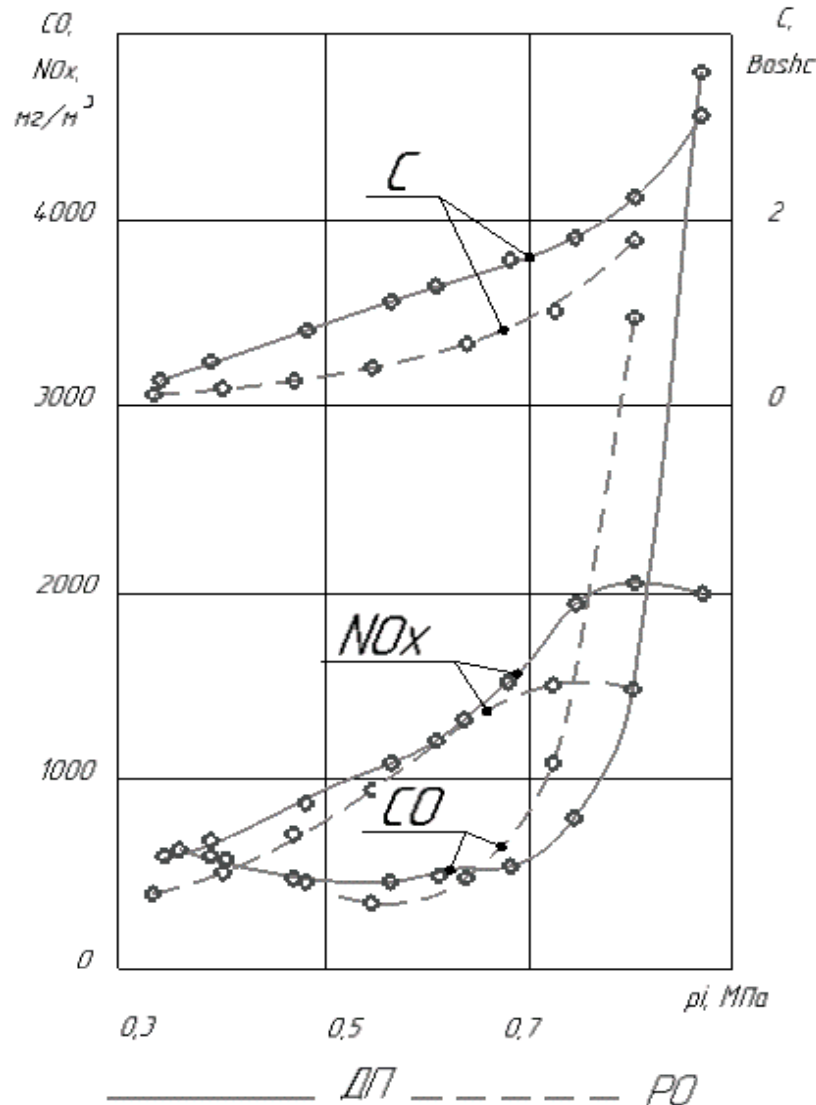


Рис. 2. Склад відпрацьованих газів

На основі аналізу отриманих даних було вирішено оптимізацію проводити в наступних напрямках:

- скорочення тривалості введення тепла в цикл;
- забезпечення оптимального моменту початку впорскування палива;
- досягнення більш високої дисперсності розпилювання палива;
- досягнення більш високої рівномірності розподілу концентрації частинок палива в поперечному перерізі факела за обсягом камери згоряння двигуна;
- зниження дальності паливного факела.

Для досягнення цих цілей були проведені дослідження впливу кута випередження впорскування палива; температури палива на вході в паливний насос високого тиску; тиску початку впорскування палива; ефективного прохідного перерізу розпилювача.

Пріоритетним напрямком в подальших дослідженнях є поліпшення економічних та екологічних показників. Для дослідження розвитку паливного факела були проведені спеціальні дослідження. Даний етап досліджень проводиться з використанням комп'ютерного обладнання із застосуванням програмного комплексу DIESEL-RK. Отримані знімки піддавалися обробці: проводилися розрахунки зміни геометричних параметрів паливного факела: кутів розкриття, швидкості поширення фронтальної частини факела, крім того проводилася порівняльна оцінка факелів ріпакової олії та дизпалива за рівномірністю розподілу крапель в поперечному перерізі факела.

На рисунку 3 наведені оброблені для порівняльного аналізу знімки паливних факелів ріпакової олії та нафтового дизпалива. Аналізом подібних знімків були отримані та математично описані закономірності розвитку паливних факелів ріпакової олії та дизельного палива. За результатами обробки даних було встановлено:

- паливний факел ріпакової олії має менший кут розкриття, різниця, в залежності від розміру порівнюваних сопел, становить 40–100%;
- процес впорскування ріпакової олії починається на 3-3,5 градуса пізніше повороту колінчастого валу, при однаковому значенні підйому голки форсунки;
- факел дизпалива має більш високу швидкість, ніж факел ріпакової олії в початкові етапи часу. З віддаленням від сопла фронт факела дизпалива швидше втрачає швидкість, тоді як фронт факела ріпакової олії продовжує переміщення з приблизно постійною швидкістю в дослідженому діапазоні часу;
- далькобійність факела ріпакової олії набагато більше;
- факел ріпакової олії володіє вищою нерівномірністю розподілу концентрації крапель палива за обсягом.

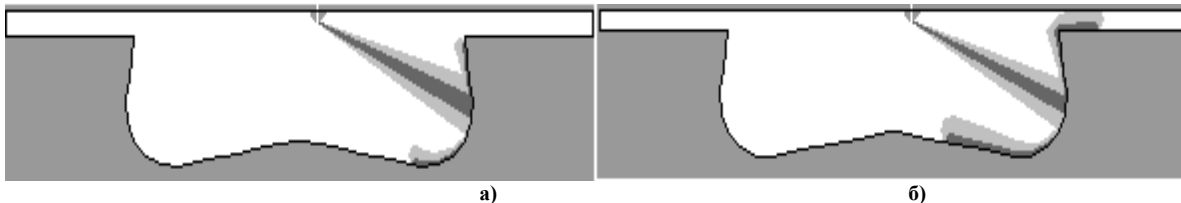


Рис. 3. Порівняльні знімки факелів дизпалива (а) і ріпакової олії (б) на фазі активного впорскування змодельовані за допомогою програмного комплексу DIESEL-RK

По завершенню цього етапу досліджень були намічені роботи за наступними напрямками: зміни конструкції розпилювача форсунки для чого проводилися порівняльні випробування трьох типів розпилювачів: застосування змішувача палив; модернізація системи живлення.

Далі наведені результати досліджень економічності в залежності від раніше обраних технологічних рішень. На рисунку 4 представлені графіки зміни показників економічності роботи двигуна в залежності від значення кута випередження впорскування палива при роботі на чистій ріпаковій олії. Оптимальним кутом випередження впорскування палива, при роботі двигуна на олії, можна вважати кут 32-33 градуси до ВМТ, що на 2-3 градуси раніше, ніж для стандартного дизпалива нафтового походження.

Для дослідження впливу температури ріпакової олії на робочий процес двигуна змішувач був обладнаний пристроєм підігріву палива на лінії низького тиску та приладами контролю температури в корпусі паливного насоса високого тиску (ПНВТ). Паливо піддавалося нагріванню в діапазоні від 40 до 95 °С.

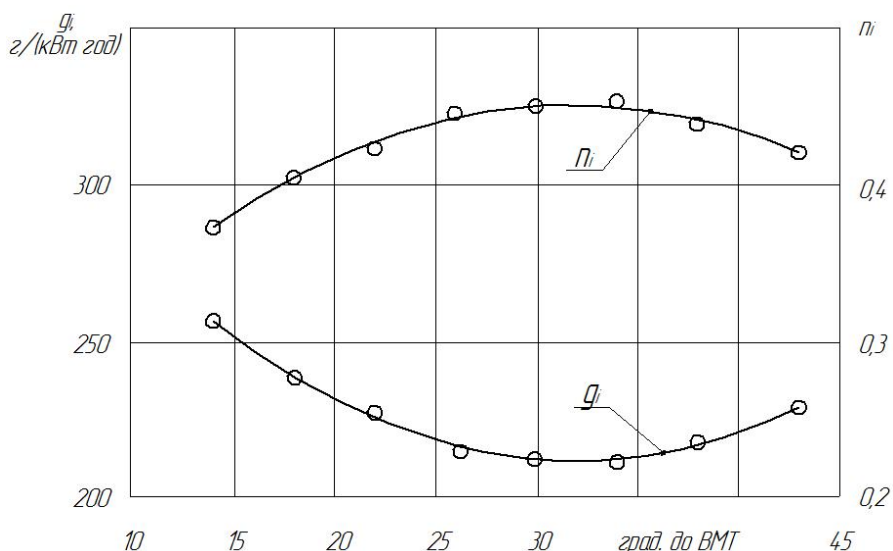


Рис. 4. Зміна параметрів економічності в залежності від кута випередження впорскування палива

На рис. 5 представлені дані дослідження впливу ступеня підігріву ріпакової олії на показники економічності роботи двигуна.

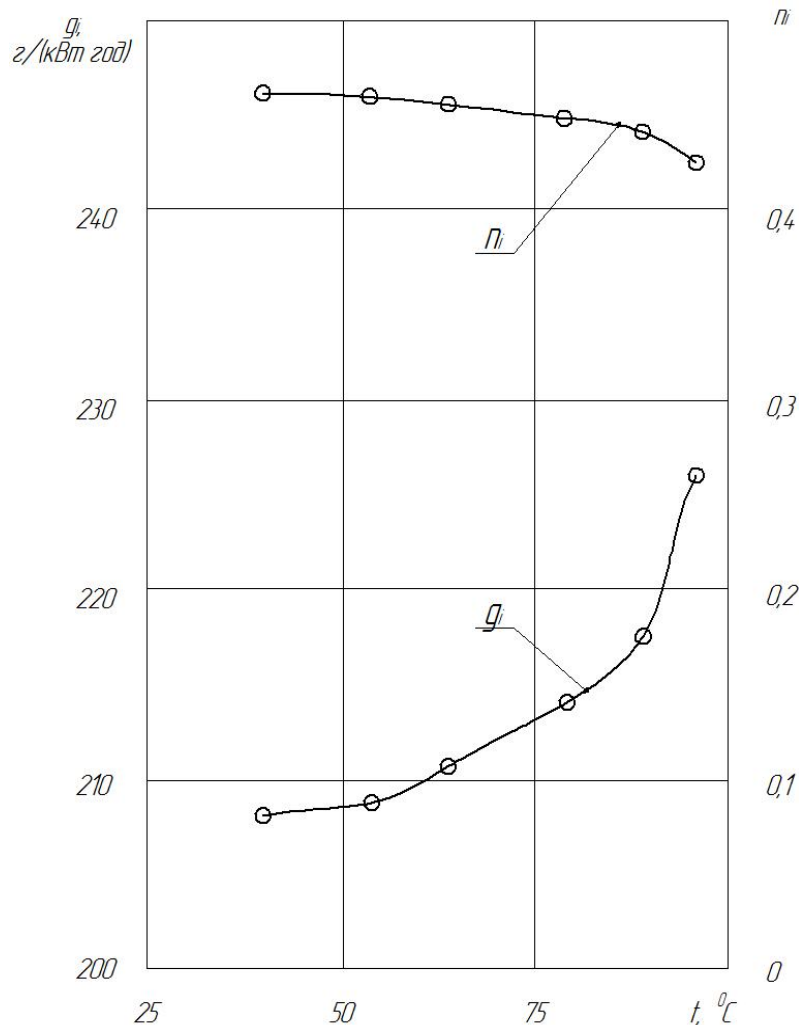


Рис. 5. Зміна показників економічності залежно від температури палива на вході в ПНВТ на режимі 1750 хв⁻¹

Виходячи з даних проведеного дослідження, можна зробити наступний практичний висновок: для організації роботи двигуна на чистій ріпаковій олії необхідно організувати підігрів палива для зниження його в'язкості та забезпечення вільного руху по трубопроводу низького тиску, особливо, через паливний фільтр. При цьому підігрів повинен бути в районі 40 °С, тому що більш низька температура призводить до значних гідравлічних втрат, а значне збільшення температури обумовлює погіршення економічності дизеля. Для форсунок номінальним значенням є тиск 17,5 МПа [14]. В ході випробувань шляхом зміни налаштування форсунки тиск змінювали в діапазоні від 15 до 22,5 МПа (рис. 6).

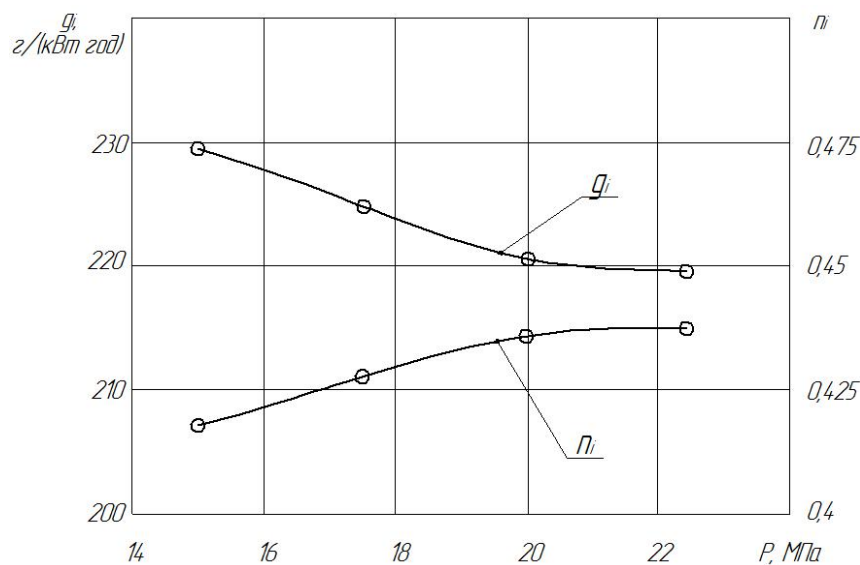


Рис. 6. Вплив тиску початку впорскування палива на показники економічності

З проведеного дослідження слідує, що недоцільно знижувати тиск початку впорскування нижче 17 МПа, тому що це призводить до істотного погіршення економічності. Підвищення тиску веде до невеликого поліпшення економічності роботи двигуна та зниження токсичності відпрацьованих газів, що дозволяє зробити висновок про доцільність його збільшення, але до меж допустимих паливним насосом даної конструкції, через зростання навантаження на деталі ПНВТ. Застосування систем подачі палива з підвищеною енергією впорскування, при використанні ріпакової олії, має позитивно позначитися на техніко-економічних параметрах двигуна, тому найбільш перспективним є використання систем Common Rail або індивідуальних насос-форсунок з тиском уприскування до 250 МПа. Одним із способів зниження впливу в'язкості на параметри подачі палива, є регулювання характеристик розпилювальних отворів форсунки. Для цього використовують розпилювачі зі збільшеним ефективним прохідним перетином (μf). В ході досліджень використовувалися розпилювачі з $\mu f = 0,237 \text{ мм}^2$ і $\mu f = 0,313 \text{ мм}^2$. Виявлено, що в області малих навантажень розпилювачі з різним ефективним прохідним перетином забезпечували однакові показники економічності (рис. 7), але в міру збільшення навантаження вище середнього розпилювачі з великим ефективним перерізом забезпечують найкращі показники економічності дизеля.

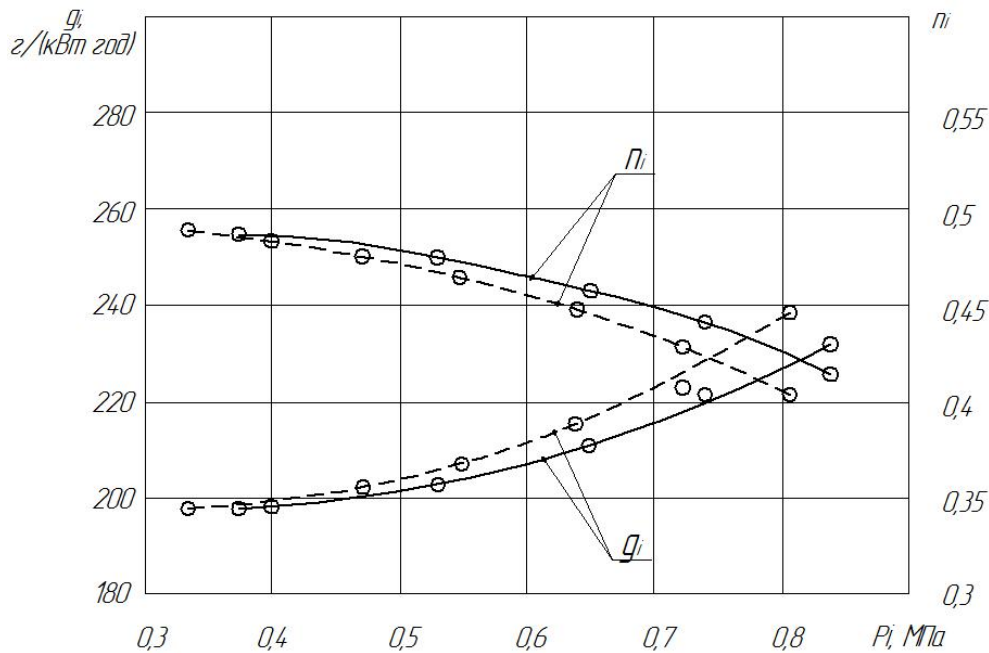


Рис. 7. Вплив ефективного прохідного перерізу розпилювача на показники економічності двигуна:
 ----- розпилювач з $\mu f = 0,237 \text{ мм}^2$; _____ розпилювач з $\mu f = 0,313 \text{ мм}^2$

Мікро- та макроструктура паливо-повітряної суміші всередині циліндра двигуна визначається дисперсністю палива. Саме від цього залежить процес займання, повнота та своєчасність згоряння. Рівномірність розподілу палива в камері згоряння залежить від напрямку паливних струменів розпилювача форсунки. В ході проектування паливної апаратури необхідно враховувати геометрію камери згоряння та властивості палива, які визначають кількість та розмір соплових отворів. На рисунку 8 представлені зразки результатів оптичного дослідження різних конструкцій розпилювачів на номінальному режимі на однаковій (за часом) фазі активного впорскування. За результатами аналізу слідує, що застосування розпилювачів спеціального типу призводить до поліпшення параметрів роботи двигуна.

Фізична сторона процесу пов'язана з поліпшенням якості сумішоутворення за рахунок більш тонкого розпилювання палива; додаткового дроблення крапель палива, завдяки ефекту «мікробибуху»; зниження локальної концентрації палива всередині паливного струменя. Хімічна сторона процесу пов'язана з каталітичним впливом водяної пари на процес згоряння:

- Настає внаслідок термічної дисоціації ОН, що прискорює процес горіння вуглеводневого палива.

- Прискорюється процес згоряння СО. В процесі випробувань були досліджені емульсії з 10%, 20% і 30% вмістом води. В результаті попередніх випробувань було встановлено, що найбільший економічний ефект при 20% води в емульсії.

За результатами випробувань було виявлено, що відбувається поліпшення економічності роботи двигуна. Індикаторний ККД збільшився до відповідного рівня роботи двигуна на нафтовому дизпаливі, а питома індикаторна витрата палива відрізняється лише на величину пропорційну різниці нижчої теплоти згоряння рапсової олії та нафтового палива.

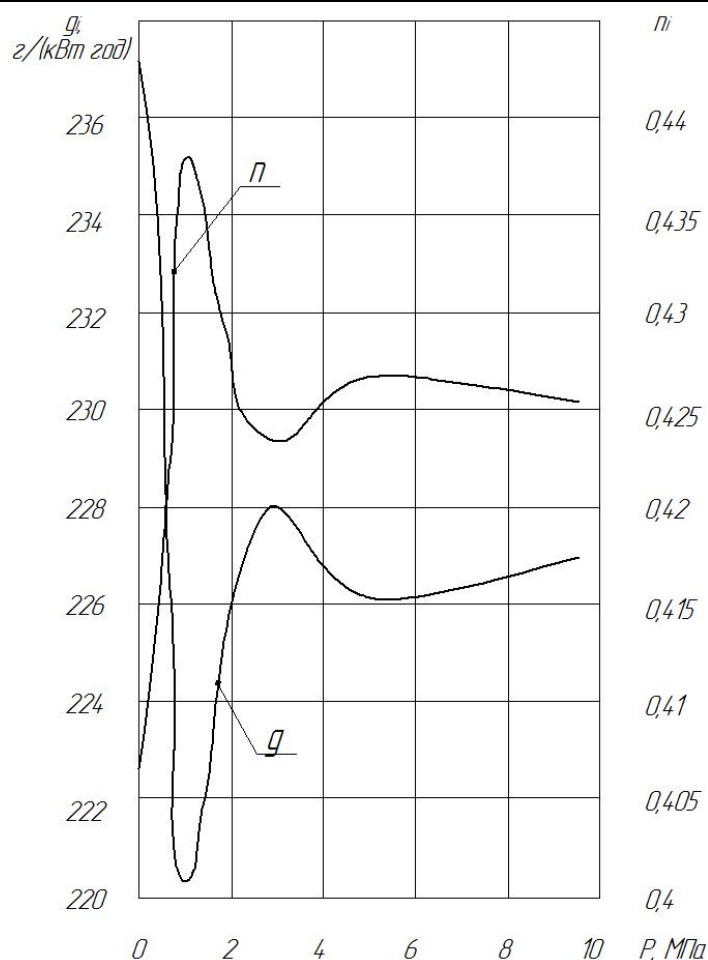


Рис. 8. Показники економічності при роботі двигуна на ріпаковій олії залежно від тиску повітря

Використання сумішей палив на основі ріпакової олії та дизельного палива дозволяє досить просто виготовити паливо в умовах господарства та передбачає використання даного виду палива без зміни конструкції двигуна, що є істотною перевагою та сприяє переходу на даний вид альтернативного палива.

Були досліджені наступні палива:

- 100% ріпакової олії (РО);
- 100% дизельного палива (ДП);
- 25% ДП + 75% РО;
- 50% ДП + 50% РО;
- 75% ДП + 25% РО.

Для сумішевих палив із збільшенням частки ріпакової олії спостерігається збільшення питомої індикаторної витрати палива в порівнянні з роботою на дизпаливі.

У міру збільшення частки ріпакової олії максимальний тиск циклу P_z знижується, зате значно збільшується максимальний тиск у паливній магістралі P_f , що призводить до збільшення динамічних навантажень, відповідно, зменшення ресурсу основних деталей та вузлів паливної апаратури. За результатами випробувань можна рекомендувати суміш 75% ріпакової олії і 25% дизельного палива, як найбільш оптимальну при експлуатації за сукупністю потужнісних, економічних та екологічних показників.

Висновки

Проведені дослідження дозволили порівняти показники робочого процесу дизеля для відпрацювання різних технологій отримання біопалива. Також вони дозволили оцінити економічні та екологічні параметри робочого процесу, можливості їх поліпшення за допомогою регулювальних та конструктивних заходів. Проводились роботи із застосуванням сумішевих палив на основі використання нафтового дизельного палива, ріпакової олії, біодизеля та його сумішей.

Література

1. Demirbas, A. Biodiesel: a realistic fuel alter-native for diesel engines. Springer-Verlag London Limited, 2008. 208 p.
2. The biodiesel handbook. AOCS Press, Champaign, Illinois, 2005. 303 p.
3. Биотопливо вместо солярки, выход из «нефтяного» тупика // Агро-Инфор. – 2006. – № 96.
4. Марченко А. П. Сравнительная оценка эффективности применения растительных топлив в

дизельном двигателе / А. П. Марченко, А. Ф. Минак, И. А. Слабун // Двигатели внутреннего сгорания. – 2004. – № 1. – С. 46–51.

5. Гунько І. В. Система паливоподачі дизельного двигуна з електронним регулюванням складу дозованої паливної суміші / І. В. Гунько, С. А. Бурлака, А. А. П'ясецький. // 2. – 2017. – №97. – С. 139–144.

6. Гунько І. В. Оцінка екологічності нафтового палива та біопалива з використанням методології повного життєвого циклу / І. В. Гунько, С. А. Бурлака, А. П. Єленич // 2. – 2018. – № 6. – С. 246–249.

7. Поляков А. П. Перевірка адекватності математичної моделі системи «двигун – система живлення сумішшю дизельного та біодизельного палив» / А. П. Поляков, О. О. Галушчак, Д. О. Галушчак. – 2018. – № 1. – С. 81–91.

8. Анісімов В. Ф. Дослідження впливу кута випередження подачі на експлуатаційні показники роботи дизеля при переведенні його на біодизельне паливо / В. Ф. Анісімов, Л. П. Серета, В. Б. Рябошапка, А. А. П'ясецький // 20. – 2008. – № 2. – С. 101–106.

9. Семенов В. Г. Моделювання процесу згорання в тракторних і комбайнових дизелях, працюючих на різних видах палива за допомогою уточненої моделі і.і. вібе шляхом апроксимації експериментальних даних / В. Г. Семенов, В. П. Комаха, В. Б. Рябошапка. – 2015. – № 1. – С. 52–58.

10. Poliakov A. P. Technique of motor vehicle indices calculation while transition of its engine for operation at the mixture of diesel and biodiesel fuels / A. P. Poliakov, O. O. Galushchak, D. O. Galushchak. – 2015. – № 22. – С. 76–81.

11. Осетров О. О. Поліпшення техніко-економічних показників дизеля ЧН 12/14, що працює на біопаливах : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.05.03 «Двигуни та енергетичні установки» / О. О. Осетров. – Харків, 2015. – 20 с.

12. Шльончак А. І. Покращення економічних та екологічних показників транспортних засобів з дизелем шляхом використання сумішевих палив : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : 05.22.20 / А. І. Шльончак ; Нац. трансп. ун-т. – К., 2013. – 20 с.

13. Поляков А.П. Дослідження впливу на техніко-економічні та екологічні показники дизеля переведення його на роботу на біодизельне паливо / А.П. Поляков, К.В. Нгаяхи Аббе, О.О. Галушчак, М.О. Бишко, Ю.В. Заверуха // Вісник Донецької академії автомобільного транспорту. – 2012. – № 1. – С 61–69.

14. Васильев И.П. Влияние топлив растительного происхождения на экологические и экономические показатели дизеля : монография / И.П. Васильев. – Луганск : Изд-во ВНУ им. В. Даля, 2009. – 240 с.

References

1. Demirbas, A. Biodiesel: A Realistic Fuel Alternator for Diesel Engines. Springer-Verlag London Limited, 2008. 208 p.
2. The biodiesel handbook. AOCS Press, Champaign, Illinois, 2005. 303 p.
3. Biofuel instead of diesel fuel, exit from the "oil" deadlock // Agro-Inform. - 2006. - No. 96.
4. Marchenko, A.P. Comparative assessment of the efficiency of plant fuels in a diesel engine / A. P. Marchenko, A. F. Minak, I. A. Slabun // Internal combustion engines. - 2004. - No. 1. - P. 46-51.
5. Gunko I.V. Fuel injection system of a diesel engine with electronic regulation of the composition of a metered fuel mixture / I.V. Gunko, S.A. Burlak, A. A. Pyasetsky // 2nd - 2017 - №97. - P. 139-144.
6. Gunko I.V. Evaluation of environmental friendliness of oil fuel and biofuels using the full life cycle methodology / I.V. Gunko, S.A. Burlak, A.P. Yelenich. // 2nd - 2018 - №6. - P. 246-249.
7. Polyakov A.P. Examination of the adequacy of the mathematical model of the system "engine - power system with a mixture of diesel and biodiesel fuels" / A.P. Polyakov, O. O. Halushchak, D.O. Halushchak. - 2018 - №1. - P. 81-91.
8. Investigation of the influence of the angle of advance on the performance of the diesel engine during its transfer to biodiesel fuel / V.F. Anisimov, L.P. Sereda, V.B. Ryaboshapka, A.A. Pyasetsky. // 20. - 2008. - No. 2 - P. 101-106.
9. Semenov V.G. Modeling of the combustion process in tractor and combine diesels working on different types of fuel with the help of a refined model i.i. Vibe by approximation of experimental data / V.G. Semenov, V.P. Komah, V. B. Ryaboshapka. - 2015 - № 1. - P. 52-58.
10. Poliakov A.R. Technique of motor vehicle indices calculation during the transition of its engine for operation in a mixture of diesel and biodiesel fuels / A. R. Poliakov, O. A. Galushchak, D. O. Galushchak. - 2015 - № 22. - P. 76-81.
11. Osetrov O. Improvement of technical and economic indicators of diesel engine CH 12/14, working on biofuels: author's abstract. dis for the sciences. Degree Candidate tech Sciences: special 05.05.03 "Motors and power plants" / O.O. Osetrov. - Kharkiv, 2015. - 20 p.
12. Shlonchak A.I. Improvement of economic and environmental indicators of vehicles with diesel using mixed fuels: author's abstract. dis for the sciences. Degree Candidate tech Sciences: 05.22.20 / A. I. Shlonchak; National trans un - K., 2013. - 20 c.
13. Investigation of influence on technical and economic and ecological indicators of a diesel engine on its work on biodiesel fuel / A.P. Polyakov, K.V. Ngaayahi Abba, O.O. Galushchak, M.O. Bishko, Yu.V. Zaveruhha // Bulletin of the Donetsk Academy of Automobile Transport. - 2012. - No. 1. - From 61-69.
14. Vasiliev I.P. Effect of fuels of vegetable origin on ecological and economic indices of a diesel engine: monograph / I.P. Vasilyev - Lugansk: ed. VNU them. V. Dahl, 2009. - 240 p.

Рецензія/Peer review : 16.2.2019 р.

Надрукована/Printed : 11.4.2019 р.

Рецензент: д. т. н., проф. Анісімов В. Ф.

ELSAYED A. ELNASHAR, ZEINAB E. ELNASHAR
Kafrelsheikh University, Egypt

EGYPTIAN SCHOOL OF STEM AND THE NEEDS' FOR THE LABOUR MARKET OF TEACHER OF EXCELLENCE THROUGH HIGHER EDUCATION

This study aims to generate a conceptual framework for Egyptian School of STEM and the Needs' for the Labor Market of Teacher of Excellence through Higher Education, specialized Science, and Technology, Engineering, and Mathematics (STEM) schools. There are 14 schools of STEM as examples of STEM-oriented programs and state initiatives. The schools exist and demonstrate what is possible for the national STEM agenda. Each program, no matter its place on the continuum of approaches to STEM, needs an explicitly stated goal and specific strategies for achieving that goal as the Needs' for the Labor Market of Teacher of Excellence through Higher Education. The current perception for these schools can be described as unique environments including advanced curriculum, expert teachers, and opportunities for internships and immersion. Researchers have categorized these schools with three types (selective, inclusive, and focused career and technical education). Messaging and marketing campaign that changes school culture and raises the prominence of STEM must be in place. Parents and community members should see that science, technology, engineering, and mathematics matter for the students, and adjust curricular expectations accordingly. Science and technology can no longer be perceived as mere enrichment, second in value to language arts and mathematics. Many schools have already learned the hard lesson that encompasses more than developing reading and scientific writing skills, and engaging in literary analysis. Content reading and writing skills, as well as evaluating evidence from non-fiction texts, now appear in the Common Core State Standards for English Language Arts. STEM education gives students access to disciplinary skills that are essential to a productive life in Egyptian School of STEM. By synthesizing the literature, we created a conceptual framework of effective learning environments for STEM schools included students, teachers, community leaders, and role models, as well as contextual factors.

Keywords: egyptian school, STEM, labor market, teacher of excellence, higher education.

ЕЛСАЄД А. ЕЛЬНАШАР, ЗЕЙНАБ Е. ЕЛЬНАШАР
Кафр-ель-шейх університет, Єгипет

ЄГИПЕТСЬКА ШКОЛА STEM ТА ПОТРЕБИ У ВИКЛАДАЧАХ ВИЩОЇ КАТЕГОРІЇ НА РИНКУ ПРАЦІ

Дане дослідження спрямоване на створення концептуальної основи для єгипетської школи STEM, до якої відносять вищі навчальні заклади, що викладають спеціалізовані науки та технології, техніку та математику (STEM). 14 STEM-шкіл, як прикладів STEM-орієнтованих програм та державних ініціатив, існують і демонструють те, що можливо для національної програми STEM. Кожна програма потребує чітко визначеної мети та конкретних стратегій для досягнення цієї мети. Ці школи можна описати як унікальні середовища, що включають передові навчальні плани, вчителів-фахівців та можливості для стажування. Дослідники поділили ці школи на три типи (вибіркове, всеохоплююче, цілеспрямоване професійне та технічне навчання). Автори відмітили необхідність створення програми обміну повідомленнями та маркетингової кампанії, яка змінює шкільну культуру та підвищує популярність STEM. Батьки та члени спільноти повинні бачити, що наука, технологія, інженерія та математика важливі для студентів, і відповідним чином адаптувати навчальні плани. STEM освіта дає студентам доступ до дисциплінарних навичок, які є важливими для продуктивного життя в єгипетській школі STEM. Таким чином, в результаті синтезу даних літературних джерел, створено концептуальну основу ефективних навчальних середовищ для шкіл STEM, включаючи їх учасників (студентів, вчителів, лідерів громад) та контекстуальних факторів.

Ключові слова: єгипетська школа, STEM, ринок праці, викладач досконалості, вища освіта.

Introduction

Education strategy of the Egyptian university education, its mission and its basic values, is determined by the vision of supporting educational institutions and schools. STEM is an academic educational institution that promotes educational knowledge and skills and its applications to serve the community and the world and form the world of teaching and learning.

Therefore, it works to develop education at all levels, both in pre-university education and higher education, in order to achieve comprehensive and sustainable human development for the Egyptian and Arab society. Moreover, it works in communication with the Arab and foreign world [1], the Ministry of Education, public and private schools, and other ministries concerned with education such as culture, information, youth and sports, among others. The main message of this mission is the direct role of a teacher in the formation of a continuous teacher. Besides that, the message is preparation of a distinguished teacher as well as promotion of educational and action research. It helps to produce educational knowledge and pre-service development as well as to develop policies and programs, which serve the society and its development, professionally [9, 14].

Egyptian school of STEM and the needs' for the labor market of teacher of excellence through the higher education was originally called Science, Mathematics, Engineering and Technology (SMET) [5, 15]. It was an initiative created by the National Science Foundation (NSF). This educational initiative was to provide all students with critical thinking skills that would make them solvers of creative problems and ultimately more marketable in the workforce. It is perceived that any student, who participates in STEM Education, particularly in the K-12 (secondary school) setting would have an advantage if they chose not to pursue a post-secondary education or would have an even greater advantage if they did attend college, particularly in a STEM field [2, 3, 5].

The increased emphasis on STEM as a component of economic development and competitiveness has mandated increased attention toward STEM in schools [4, 11, 14]. There have been movements in response to the mandate that were designed to address the need for increased attention toward STEM education and shift how we teach STEM to K-12 (secondary school). The resulting STEM education initiatives include the Common Core State Standards-Mathematics (CCSS-Math) and the Next Generations Science Standards (NGSS) [12, 13, 14]. The anticipated outcome of these STEM education standards is an application or practice-based approach to K-12 (secondary school) STEM teaching and learning. An expected outcome is an increase in the number of students well prepared for postsecondary education and workforce entry. There is also the anticipated outcome of increasing the number of students interested in pursuing STEM careers, particularly in high need areas such as engineering [5, 14].

Although the use of STEM concepts (historically) were being implemented in many aspects of the business world; i.e., the Industrial Revolution, Thomas Edison and other inventors, it was not being utilized in traditional educational settings. The Egyptian School of STEM and the Needs' for the Labor Market of Teacher of Excellence Through Higher Education and the use of STEM was primarily used in engineering firms to produce revolutionary technologies such as the light bulb, automobiles, tools and machines, etc. Many of the people responsible for these innovations were only slightly educated and/or were in some type of apprenticeship. For example, Thomas Edison did not attend college [1], nor did Henry Ford; although Ford did work for Thomas Edison for a number of years. These “giants” of innovation used STEM principles to produce some of the most prolific technologies in history. However, STEM in education was virtually non-existent [2, 5, 14].

Program Description of Egypt STEM Schools [16]

The Egypt STEM Schools Project provided a springboard for the country's youth to succeed through innovative science, technology, engineering, and math (STEM) education. World Learning, in partnership with the Franklin Institute, the 21st Century Partnership for STEM Education, the Teaching Institute for Excellence in STEM, and the Egyptian Ministry of Education (MoE), developed a network of eleven STEM high schools that embody trans-disciplinary collaboration, real world applications, and critical thinking. This initiative directly supports a new vision of Egypt as a country equipped with both the human capital and institutional resources to compete and excel in the international marketplace. Program Goals are as follows [16]:

- increase student interest, participation, and achievement in science and mathematics;
- strengthen the STEM school initiative by developing an effective model for specialized high schools;
- build the capacity of a highly qualified cadre of STEM professionals and provide opportunities for training and sustained, intellectually rigorous professional learning;
- strengthen MoE capacity at the systems and policy level to sustain and replicate these model schools;
- support the MoE in upgrading science and mathematics curriculum standards, student assessments, and teacher preparation for mainstream schools.

Definition about the “T and E” of STEM Education

Science: the systematic study of the nature and behaviour of the material and physical universe, based on observation, experiment, and measurement, and the formulation of laws to describe these facts in general terms (Science).

Technology: the branch of knowledge that deals with the creation and use of technical means and their interrelation with life, society, and the environment, drawing upon such subjects as industrial arts, engineering, applied science, and pure science (Technology) [9].

Engineering: the art or science of making practical application of the knowledge of pure sciences, as physics or chemistry, as in the construction of engines, bridges, buildings, mines, ships, and chemical plants (Engineering).

Mathematics: a group of related sciences, including algebra, geometry, and calculus, concerned with the study of number, quantity, shape, and space and their interrelationships by using a specialized notation (Mathematics).

The **Definition** “T and E” of STEM Education appears to be a stumbling block to producing a meaningful STEM experience to K-12(secondary school) education students. There are several possible reasons for this and they are as follows [5]:

- 1) as it was mentioned before Science and Mathematics are the most recognizable fields in STEM Education and most educators in these areas feel comfortable teaching them;
- 2) many educators, which are not in the fields of Engineering and/or Technology, are intimidated with processes that are associated with them;
- 3) although Engineering is a recognizable word, which most educators can somewhat relate, many who are not in the fields are not sure what engineers actually do in terms of education;
- 4) many consider Technology as just a computer related field;
- 5) many educators are comfortable in their fields and create “educational silos”.

Definition Technology Education

Definition Technology Education has a long and rich history not only nationally, but globally as well. As society evolved from the Agrarian Age, to the Industrial Revolution and now the Information Age, through several paradigm shifts, Definition Technology Education has grown and expanded and is now in the midst of yet another paradigm shift [1]. The current shift is aligning science, engineering and mathematics with Technology Education in what is called the integrative STEM initiative [2]. An extra emphasis on engineering specifically is also being called

for by many technology educators. Furthermore, the trend indicates that several institutions of higher learning are changing the names of their programs to Engineering and Technology Education [5, 9, 10].

In most dictionaries, technology is defined as “applications of tools and methods” or something similar. To the general public, and especially in education, the term technology is spelled “c-o-m-p-u-t-e-r-s,” equating “technology” to one technological tool. A computer is a tool, but provides a very narrow view of the scope of technology as a whole. Computers are definitely one form or type of technology, but technology is much, much more than computers alone. Technology encompasses several different constructs that have been categorized by several state and national programs, organizations and standards. They include: Bio and Medical Technologies, Construction, Engineering and Manufacturing Technologies, Electronics, Energy and Power, Information Technologies and Transportation. Within these constructs are a plethora of sub-technologies. For example, Energy and Power technologies can include sub-technologies from automobile engines to green energy sources such as solar and wind energy [5].

Definition Technology and Engineering Education

Definition the study of technology and engineering, defines technology as “how humans modify the world around them to meet their needs and wants or to solve practical problems.” Thus, Technology and Engineering Education is problem-based learning by students utilizing math, science, engineering and technology principles. These studies involve [5]:

- designing, developing, and utilizing technological systems [10];
- open-ended, problem-based design activities;
- cognitive, manipulative, and effective learning strategies;
- applying technological knowledge and processes to real world experiences using up-to-date resources;
- working individually as well as in a team to solve problems.

Definition Educational Technology and Technology Education

Technology Education is a problem-based learning by students utilizing math, science, engineering, and technology principles. Educational Technology (also referred to as Instructional Technology) is the use of technology to educate students.

Instructional Technology is the theory and practice of design, development, utilization, management and evaluation of processes and resources for learning. Thus, Educational Technology uses technology (mainly computer-based) in pedagogical methods of instruction and assessment [17]. This can include the use of PowerPoint, Blackboard, digital assessment programs, Web searches, DVDs and videos in addition other instructional multimedia [5]. Technology Education teachers may use educational technology to deliver lessons and for assessment. However, the confusion between the two disciplines is clearly a problem for most educators. The leaders in Technology and Engineering Education recently made a name change from “Technology Education” to “Technology and Engineering Education” in an attempt to alleviate the confusion and have a solid identity within the educational community [5, 17].

Theoretical Framework of Labor Market Mobilization

Complementary Planet Knowledge (CPK), analysis detailed examination of the elements of the cooperation in STEM invention, and it symbolizes direction shift towards systemic, open and user is main point of interest. Innovation policy. A covenant of development, more extensive of production and linear services led by experts allows for different forms and levels of co-production with consumers, customers and citizens. As defy to public organization authorities and the production of public services, the debate on knowledge about the planet is directly related to the Vision 2030 Vision for Smart STEM and Sustainable and Inclusive Growth, and thus shifts to better stakeholder communication and smarter use of resources advocated by many Egyptian states [6].

Research questions

What are the roles of Egyptian School of STEM and the Needs' for the Labor Market of Teacher of Excellence education in fostering labor market mobilization?

Does the Egyptian Faculties of Education adopt innovative practices?

What are the challenges to labor market mobilization of Egyptian School of STEM and the Needs' for the Labor Market of Teacher of Excellence education in Egypt?

How Egyptian School of STEM and the Needs' for the Labor Market of Teacher of Excellence education can improve their innovative capacity?

Research Objectives:

- to explore the roles of Egyptian School of STEM and the Needs' for the Labor Market of Teacher of Excellence through Higher Education in fostering Labor market mobilization;
- to analyze the activities of Egyptian School of STEM and the Needs' for the Labor Market of Teacher of Excellence through Higher Education and the similar authority in other countries that have distinct experiences in promoting innovation;
- to examine the challenges to Labor market mobilization of Egyptian School of STEM and the Needs' for the Labor Market of Teacher of Excellence through Higher Education;
- preparation and sustainable development of professional teachers of Egyptian School of STEM and the Needs' for the Labor Market of Teacher of Excellence through Higher Education in order to improve Egyptian faculties of textiles education.

Experimental Work and Methodology

Methodology

In order to achieve the main objective of the current study it is necessary to perform the following activities types:

- active participation of scientific papers from some schools to analyse the current situation;
- comparative scientific studies in the development of teacher preparation systems, and global trends;
- two workshops attended by more than 25 experts and of Egyptian School of STEM;
- approve proposals for Egyptian School of STEM development policies;
- expert meetings to present procedural proposals and prepare the pilot model;
- discussion of the proposed model at the meeting of Egyptian School of STEM.

Quality education is a research method that results in words instead of statistics. Its research is based on a person's behavioural life in the organization of STEM education, interaction between nations and the cultural phenomenon. The study of qualitative research focuses on personal experience in STEM institution. It is based on description and detailed examination of the elements rather than use of numbers. It is also flexible to verify responses from participants because the information contained in this paper can be a source through a relative educational approach to the STEM.

The reasons for choosing the method are that they are related to the nature of the Egyptian School of STEM research problem. They are suitable for investigations such as organizations, people's lives, thereafter in addition related to finding the nature or meaning of human experience. Besides, they have enough complex information in trajectory with the suggestions of authors of [8, 7].

Data Collection

Research of Egyptian School of STEM and data collection on the latest Egyptian School of STEM programs were conducted in seven countries across five of the most successful international experiences to benefit from. The data of the previous experiments were analyzed and the results presented to a group of workshops.

Workshops

The first workshop attended was entitled "Towards Instructional model for the development of Egyptian School of STEM". Places of the workshop locations are as follows: Sector Committee, Giza and Holiday Inn-Maadi, Cairo, Egypt. The issues discussed are as follows: specifications of the graduate; the component of public culture in teacher preparation program; sustainable professional development, and Egyptian School of STEM.

Results and Discussions

Personal and societal decisions in the 21st century increasingly require scientific and technological understanding. Whether about health, the environment, or technology, a certain level of scientific knowledge is vital to informed decision making. Thus, another goal of STEM education is to prepare citizens to face the challenges of a science- and technology-driven society.

Egyptian societies and school-level achievement test data are the most widely available measures and the measures used for accountability purposes. Therefore, they are the measures most commonly used to gauge success, regardless of the goals of a particular school or program. Although it is difficult to measure interest and motivation ("joy at the prospect of discovery"), creativity ("a culture of innovation"), or commitment to "ethical behavior and the shared interests of humanity," it is essential to do so given the importance of preparing students to be leaders in STEM innovation and not just good test takers.

Successful STEM education also takes place in "regular" comprehensive schools in grades K-12 (secondary school), which educate the vast majority of the nation's students. Egyptian societies includes many talented and aspiring scientists, mathematicians, and engineers who might not have access to selective or inclusive STEM-focused schools. Egyptian societies are generally preparing students for postsecondary success, and emphasizing the development of inquiry and reasoning skills. Effective instruction capitalizes on students' early interest and experiences, identifies and builds on what they know, and provides them with experiences to engage them in the practices of science and sustain their interest. According to the research, effective instruction actively engages students in science, mathematics, and engineering practices throughout their schooling. Students in these schools have opportunities to learn science, mathematics, and engineering by addressing problems that have real-world applications.

However, this type of STEM instruction remains the exception in Egyptian society's schools. Extraordinary teachers who overcome a variety of challenges that stand between vision and reality typically facilitate it. Enterprise to be effective, teachers need content knowledge and expertise in teaching that content, but the research suggests that science and mathematics teachers are particularly underprepared for these demands. Weak initial teacher preparation heightens the importance of continuing professional development, but the available research suggests that professional development in STEM, when available, discipline, and effective professional development should:

- focus on developing teachers' capabilities and knowledge to teach content and subject matter,
- address teachers' classroom work and the problems they encounter in their school settings.

In addition, while provide multiple and sustained opportunities for teacher learning over a substantial time interval the STEM disciplines, districts need to enhance the capacity of K-12 (secondary school) teachers. STEM teachers should have a deep knowledge of their subject matter and "an understanding of how students' learning develops in that field".

Problems Analyses

1. The number of private schools that adopt STEM education is increasing from 14 to 27 schools. There are

ministerial decisions to mainstream the STEM philosophy and expand it to include government schools in all stages in all governorates of Egypt.

2. Studies have shown that there is a shortage of teachers to work in these schools locally, regionally and internationally, and this fills the urgent need for the proposed program.

3. There is an urgent need for the proposed diploma in the light of global developments, and the required preparation of chemistry and physics teachers, mathematics, technology and engineering, and English, who are able to bring up a generation of learners able to cope with rapid developments, especially in the areas of science, technology, engineering and mathematics.

4. The need to prepare and qualify teachers through an integrated education perspective that focuses on the development of the skills of innovation, leadership and communication in all these fields through their integration. The following special diploma in education will offer the proposed program – Teaching chemistry, physics, mathematics, technology and engineering, English Language, STEM Education.

5. The need for a teacher capable of addressing the shortcomings of the educational curricula in these areas, and to achieve the quality of education required, in order to provide the labor markets with specialized forces in the field of chemistry and physics, mathematics, technology and engineering, and advanced English.

6. Meeting the requirements of the labor market by preparing specialized forces equipped with the skills required to work in areas related to the past decade has increased the functions related to chemistry, physics, mathematics, technology, engineering, and English, faster than three times.

7. The development of 21st century skills is one of the most important objectives of STEM education. These skills relate to communication skills, complex thinking and communication. This is the focal point of STEM education, which focuses on preparing citizens, who can use their skills and knowledge in finding solutions to problems that will ultimately make people's lives better.

8. The proposed program is expected to meet those needs, with the aim of qualifying teachers specialized in chemistry, physics, mathematics, technology and engineering, and English language, to work in various stages and types of education. It is needed in order to deepen the scientific, educational and applied knowledge of chemistry, physics, mathematics, technology, engineering, and English through the discussion and analysis of theoretical scientific research. Developing concepts, skills and integrated practices in teaching chemistry, physics, mathematics, technology, engineering, and English, in accordance with contemporary global trends in project-based teaching is needed as well.

The graduates of this special diploma in Education - Teaching Chemistry, Physics, Mathematics, Technology, Engineering and English (STEM) will be able to obtain a variety of job opportunities inside and outside the Arab Republic of Egypt.

Feasibility Study of the Proposed Program

There are special expenses for admission to the proposed program. University will apply to this program all administrative and financial regulations for the credit hours system at the Faculty of Education in respect of registration, tuition, and the general cost of the program.

The faculty members who will be nominated from the Department of Curriculum and Teaching Methods at the Faculty of Education (specialization of curricula and methods of teaching science and mathematics) will participate in teaching in this course. Members of a specialized teaching staff will teach the proposed program. In addition, there are enough faculty members in the department to supervise the practical education program.

The Department of Curriculum and Instruction in the Faculty of Education will supervise the assignment of faculty members to teach related courses in chemistry, physics, mathematics, technology, engineering, English language, among the professors of the Faculty of Engineering and associated colleges.

The Schools of Excellence in Science, Technology, Engineering and Mathematics (STEM) are located in the Arab Republic of Egypt (14 schools, one in the university, which is closed away from the Faculty of Education). Government sources are available to apply the program of practical education in the proposed program. It is worth mentioning that there are many international programs in the Education STEM, including the American model and the various European models, which will be reviewed and used in building the proposed program, but the current program does not follow a specific program. The program was designed and built in accordance with the cultural context of Egypt, satisfying its needs and satisfying its future aspirations in this field and in line with the global trends as well.

Objectives of Diploma

The diploma aims to qualify teachers who specialize in teaching chemistry, physics, mathematics, technology, engineering, English language to work in different stages and types of education. It aims to deepen the scientific, educational and applied knowledge of chemistry, physics, mathematics, technology, engineering, and English teachers through the discussion and analysis of theoretical scientific research. Therefore, it would be able to develop concepts, skills and integrated practices in chemistry, physics, mathematics, technology, engineering, and English, in accordance with contemporary global trends in project-based teaching. The Diploma aims to produce graduates who are able to work as teachers of chemistry, physics, mathematics, technology, engineering and English language, according to STEM.

The nature of the study and the educational model of the Diploma

The study is based on a Learning Blended learning model that combines distance learning using e-learning technologies (electronic courses, virtual classes, video lectures) and traditional teaching methods to attend university

headquarters. In all cases, students must attend 75% in each semester. Each student shall be assigned an academic advisor for follow-up during the selection of courses or preparation of the project.

Evolution of Specialized STEM Schools

National accreditation in the Egyptian society during the latter half of the 20th century placed more emphasis on education. Concurrently, more SMT schools were created through state wide initiatives. One of the first state initiatives to emerge at this time was a residential summer program for gifted students in Cairo and Giza. In this program, a residential specialized SMT school took the name The Cairo and Giza School of Science and Mathematics.

Over time, each Egyptian governments (14) has made similar progress in founding a residential specialized SMT school for highly capable students and they came together to establish the National Consortium for Specialized Secondary Schools of Mathematics, Science, and Technology. The fourteen founding schools perform the function of a catalyst for advancing STEM education by providing students, teachers, and communities with the means to achieve in a technology driven society. The overall mission of the consortium is to prepare students for success and leadership in STEM, scaffolding communication and collaboration between member schools, transmitting information about current developments in STEM education, and expanding efforts for advanced STEM education. Currently, there are over thousands students and educators in almost 14 institutions. Together, these individuals and institutions work with people in over five additional affiliate collages.

The evolution of STEM education in the last century also included a transition from “manual training schools” to “specialized SMT schools”. In the late 20th and early 21st centuries, additional schools took the name “specialized STEM schools.” These schools were often created through state and national initiatives designed to address concerns over Egyptian economic competitiveness and the perceived shortage in the STEM workforce. The current perception of most education leaders, policymakers, and researchers for specialized STEM schools can be described as in following sentence. Specialized STEM schools offer a unique and comprehensive environment, which includes an advanced curriculum and opportunities for significant immersion in the work of the field through mentorships, internships, and research apprenticeships that are often beyond what is available in even the best high schools. STEM schools offer a faculty with exceptionally high levels of content area expertise, often consisting of doctorates in content areas; and a select population of students who are homogeneous with respect to ability levels, interests, and aspirations.

Curriculum in STEM Schools

Results of the study with 14 participating schools indicated that specialized STEM schools were likely to offer research opportunities for students of the schools who conducted research with a faculty member or a mentor. The students continued their research throughout summers with the assistance of a mentor. In addition, students conducted their own research using either a laboratory or off-campus facility. Not surprisingly, students in STEM schools participated in contests to disseminate results of their research. Administrators of six schools indicated that incorporation of STEM is content with the humanities curriculum. While administrators in schools identified a minimum number of mathematics courses for students, only some of schools required a minimum number of science courses.

Conclusion

In the current study, we focused on specialized STEM schools to answer research questions. These questions were related to the historical background of the learning environments found within these schools as well as the demographic characteristics and college and career readiness of students within the schools. We found these schools are unique and comprehensive environments. In addition, we found critical design components for Establish Diploma for Needs' for the Labor Market of Teacher of Excellence through Higher Education. Moreover, three common models are used to describe Diploma for these schools. Theoretical ideas and empirical findings contributed to this theoretical study. Participatory research on the Diploma provides engagement and negotiation for researchers. We contend the Diploma ecology metaphor can contribute to expanding definitions for the Diploma and understanding of who is involved in learning environments. However, caution must be used when making inferences for specific learning environments from broad generalizations about participants, contextual factors, and actions. Unintended consequences may result without regard for the specific environments.

Acknowledgements

Thanks and appreciation to Prof. Dr. Hassan Al-Bebawi, Chairman of the Educational Studies Sector Committee at the Supreme Council of Egyptian Universities for his commendation for me to participate and attend the STEM workshops.

Thanks and appreciation to Prof. Dr. Rida Abu Saree, Responsible for the Ministry of Education project for inviting me to attend the workshops.

References

1. Beals G. Thomas Edison Home Page [Electronic resource] / Gerald Beals. – 2012. – Retrieved from <http://www.thomasedison.com/>.
2. Will the scientific and technology workforce meet the requirements of the federal government / [W. Butz, T. Kelly, D. Adamson, & others]. – Pittsburgh: PA: RAND, 2004.

3. Brody L. Measuring the effectiveness of STEM talent initiatives for middle and high school students. Paper presented at the annual meeting of the National Academies Center for Education / Brody. – Washington: DC, 2006.
4. Carnevale A. P. Science Technology Engineering Mathematics / A. P. Carnevale, N. Smith, M. Melton // STEM. – 2011. Retrieved from <http://cew.georgetown.edu/STEM/>
5. White D. W. What is STEM education and why is it important? / David White // Florida Association of Teacher Educators Journal. – 2014. – № 1 (14). – С. 1–8. Retrieved from <http://www.fate1.org/journals/2014/white.pdf>
6. Elnashar E. A. Faculties of textiles education between challenges and renaissance in the 21st century for labor market mobilization / E. A. Elnashar // Applied Researches in Technics, Technologies and Education Journal of the Faculty of Technics and Technologies, Trakia University, Bulgaria. – 2018. – P. 108–120. Retrieved from <https://sites.google.com/a/trakia-uni.bg/artte/articles/artte-vol-6-no-2>
7. Elnashar E. A. Engineering Business Models Of Creative Communities Industrial Of Internationalization Small Firms In Mahalet Marhoum City / E. A. Elnashar, G. Colovic // Tekstilna industrija. – 2016. – № 3.
8. Elnashar E.A. Decision support system for higher education (research` examiners & reviewers) in Egyptian / E.A. Elnashar, A. Heggi // Innovation and Entrepreneurship. – 2017. – № 3. – P. 104–126. Retrieved from <http://eprints.ugd.edu.mk/18198/1/Inovaci%20br%203.pdf>
9. Elnashar E. A. Technology for the renaissance strategy and sustainable development of Egyptian faculties of education / Elsayed Elnashar // Supreme Council of Egyptian Universities, educational studies sector committee (planning committee), project of developing colleges of education, Egypt. – 2017.
10. Elnashar E. A. Education in the professional field “Design” – a comparative analysis of Egyptian and European experience in this study area of higher education" / E. A. Elnashar, Z. Zlatev, P. Boneva // International Journal of Advanced Educational Research. – 2017. – № 2. – P. 5–9.
11. Holdren J. P. Prepare and inspire: K-12 education in science, technology, engineering, and math (STEM) for America's future / J. P. Holdren, E. S. Lander, H. Varmus (Executive Report). Washington, D.C.: President's Council of Advisors on Science and Technology. – 2010.
12. National Governors Association Center for Best Practices, Council of Chief State School Officers. Common core state standards for mathematics. – Washington DC: National Governors Association Center for Best Practices, Council of Chief State School Officers. – 2010.
13. A framework for K-12 science education: Practices, crosscutting concepts, and core ideas // National Research Council. Washington, DC: National Academies Press. – 2011.
14. Sanders M. The Technology Teacher / Sanders M. // STEM education. – 2009. – № 68. – P. 20–26.
15. World learning "Egypt-Stem-Schools-Project" [Electronic resource]. – 2018. – Retrieved from <https://www.worldlearning.org/program/egypt-stem-schools-project/>.
16. Veselina N. Online collaboration for improving the quality of training course for craft tapestry in Egypt / N. Veselina, E. A. Elnashar, Z. Zlatev // ICVL International conference of Virtual Learning – Virtual Reality Models and Methodologies Technologies and Software Solutions, October 28, 2017 at ICVL 2017, Department of Computer Science and Electrical – University of Sibiu, Romania. – 2017. Retrieved from <http://www.c3.icvl.eu/2017/accepted-abstract-list>.

Рецензія/Peer review : 21.3.2019 р.

Надрукована/Printed :11.4.2019 р.

Стаття рецензована редакційною колегією

А. А. МЯСИЩЕВ
Хмельницкий национальный университет

ПРОГРАММИРОВАНИЕ ESC РЕГУЛЯТОРОВ SIMONK-30A И EMAX SIMON-12A ЧЕРЕЗ ARDUINO И ПОЛЕТНЫЙ КОНТРОЛЛЕР

Показана необходимость перепрограммирования ESC регуляторов современными прошивками, например BLHeli или SimonK в зависимости от аппаратной части регулятора. Если регуляторы основаны на микроконтроллерах ATMEЛ (АТмега8а и др.), то используются прошивки BLHeli или SimonK, если используются микроконтроллеры SILABS(F330, F39X), то они прошиваются только BLHeli. В работе отмечено, что протокол PWM связи полетного контроллера с ESC регулятором не синхронизируется с работой гироскопа летательного аппарата. Поэтому ESC получает старый сигнал от контроллера полета. Показано, что OneShot125 синхронизирует импульсы аппаратуры управления с выходом сигнала с гироскопа. Это позволяет ESC иметь самые актуальные последние данные из полетного контроллера без больших задержек, и это стало возможным потому, что длина управляющего импульса OneShot125 в 8 раз меньше чем у PWM. Синхронизация позволяет осуществлять более точное управление, устанавливать более высокие значения PID и добиться большей стабильности полета особенно для гоночных квадрокоптеров. Показано, что прошивка SimonK способна поддерживать относительно медленные протоколы PWM и OneShot125 и в настоящее время не поддерживается. Работает только на микроконтроллерах ATMEЛ. Прошивка BLHeli поддерживает всю линейку высокопроизводительных современных протоколов. Она работает на микроконтроллерах ATMEЛ, SILABS. В зависимости от модели микроконтроллера SILABS поддерживаются разные по производительности протоколы. Установлена возможность использования Arduino Nano для программирования ESC EMAX-12A прошивкой BLHeli через три проводника в случае невозможности использования начального загрузчика из-за аппаратных ограничений регулятора ESC для прошивки по сигнальному кабелю. Установлено, что при аппаратной доработке ESC регулятора EMAX-12A (и других ESC из этой серии) существует возможность программирования ESC через сигнальный провод, который используется для подключения к полетному контроллеру. В этом случае программирование ведется также через Arduino Nano. В работе рассмотрено программирование ESC регулятора Simonk-30A самой последней версии прошивки SimonK через Arduino Nano по одному сигнальному проводу с помощью программы BLHeliSuite.exe. Установлено, что если все ESC регуляторы (или несколько) подключены к полетному контроллеру с прошивкой CleanFlight (опробована ver.2.5.0), то ESC регуляторы можно прошивать новыми прошивками, необязательно BLHeli, а также менять параметры регуляторов, если используется прошивка BLHeli. Если используется полетный контроллер, например APM 2.6, то перепрошивку ESC можно выполнять по сигнальному проводу через Arduino, предварительно отключив ESC от полетного контроллера.

Ключевые слова: ESC, EMAX-12A, SimonK, PWM, OneShot125, Arduino Nano, BLHeli, Dshot, SILABS F330, MultiShot, CleanFlight.

А. А. MYASISCHEV
Khmelnytskyi National University

PROGRAMMING ESC SIMONK-30A REGULATORS AND EMAX SIMON-12A THROUGH ARDUINO AND FLIGHT CONTROLLER

The necessity of reprogramming ESC controllers with modern firmware, such as BLHeli or SimonK, depending on the controller's hardware, is shown. If the regulators are based on ATMEЛ microcontrollers (ATmega8a, etc.), then BLHeli or SimonK firmware is used; if SILABS (F330, F39X) microcontrollers are used, then only BLHeli is flashed. The paper noted that the PWM communication protocol of the flight controller with the ESC controller is not synchronized with the operation of the gyroscope of the aircraft. Therefore, the ESC receives the old signal from the flight controller. It is shown that the OneShot125 synchronizes the pulses of the control equipment with the output of the signal from the gyroscope. This allows the ESC to have the most up-to-date latest data from the flight controller without major delays, and this was possible because the OneShot125 control pulse length is 8 times smaller than that of the PWM. Synchronization allows for more precise control, setting higher PID values and achieving greater flight stability, especially for racing quadcopters. SimonK firmware has been shown to support the relatively slow PWM and OneShot125 protocols and is not currently supported. Works only on ATMEЛ microcontrollers. BLHeli firmware supports the entire line of high-performance modern protocols. It works on ATMEЛ, SILABS microcontrollers. Depending on the SILABS microcontroller model, different protocols are supported. The possibility of using Arduino Nano for programming ESC EMAX-12A with BLHeli firmware through three conductors in case it is impossible to use the initial loader due to the hardware limitation of the ESC controller for firmware over the signal cable has been established. It has been established that with the hardware revision of the ESC controller EMAX-12A (and other ESC from this series), it is possible to program the ESC through a signal wire that is used to connect to the flight controller. In this case, programming is also carried out through the Arduino Nano. The paper describes the programming of the ESC controller Simonk-30A with the latest version of the SimonK firmware via Arduino Nano over a single signal wire using the BLHeliSuite.exe program. It has been established that if all ESC controllers (or several) are connected to a flight controller with CleanFlight firmware (tested ver.2.5.0), then ESC controllers can be flashed with new firmware, optionally BLHeli, and also change controller settings if BLHeli firmware is used. If a flight controller is used, for example, APM 2.6, then the ESC flashing can be performed over the signal wire through the Arduino, after disconnecting the ESC from the flight controller.

Keywords: ESC, EMAX-12A, SimonK, PWM, OneShot125, Arduino Nano, BLHeli, Dshot, SILABS F330, MultiShot, CleanFlight.

Постановка задачи

Известно, что ESC это Electronic Speed Controller, который необходим для контроля скорости двигателей. ESC получает сигнал дроссельной заслонки аппаратуры управления от контроллера полета и приводит в движение бесщеточный двигатель с оптимальной скоростью, обеспечивая необходимый

уровень электрической мощности. Качественные ESC с качественной прошивкой обеспечивают надежный и беспроблемный полет. Большинство ESC поставляются с программным обеспечением (прошивкой) производителя. Однако такие прошивки не всегда оптимальны для этого ESC. Часто на ESC устанавливается прошивка с открытым исходным кодом SimonK и BLHeli, однако версии этих прошивок являются устаревшими и поддерживают старые протоколы связи полетного контроллера и ESC. Например, устаревший протокол PWM. Бывают случаи, когда ESC поставляется с прошивкой BLHeli, не рекомендованной для этого ESC. Например регуляторы EMAX Simon-12A приходят с прошивками EMAX20A Rev.-14.3.-Multi. Хотя рекомендацией BLHeli для EMAX Simon-12A является прошивка XP-12A Rev.-14.9.-Multi. Также видно, что и прошивка Rev.-14.3. является устаревшей. Аналогичная ситуация с ESC SimonK 30A, которые используют устаревшую прошивку Simonk, не поддерживающую протокол OneShot125. Следует отметить кроме SimonK и BLHeli также и новые прошивки:

- BLHeli_S является вторым поколением прошивки BLHeli, разработанной специально для ESC с процессорами Busybee с аппаратным PWM. Прошивки Simonk и BLHeli формируют программный PWM.

- BLHeli_32 для ESC является третьим и последним поколением BLHeli. Прошивка написана специально для 32-битных процессоров ESC и ее программный код был закрыт. Эти ESC с более мощными процессорами обеспечивают более плавную, точную и надежную работу, чем предыдущие ESC.

Прошивка SimonK начиная с 2016 года не поддерживается. Ее последняя версия была выпущена 12-09-2015г. Перечисленные выше замечания требуют выполнения перепрошивки перечисленных выше регуляторов.

Изложение основного материала работы

Протокол ESC используется для связи между FC (контроллером полета) и ESC, в основном для того, чтобы контролировать скорость вращения двигателя. Первоначально протокол был основан на широтно-импульсной модуляции, имеющей аббревиатуру ШИМ или PWM. Это способ получения аналогового результата цифровыми средствами. Цифровые средства здесь используются для получения импульсов квадратной формы. Сигнал переключается между двумя состояниями, On и Off. В случае прошивки полетного контроллера прошивкой LibrePilot, сигнал PWM используется для указания ESC положения позиции стика Газа на пульте управления. На рисунке 1 показан стандартный сигнал PWM с частотой следования импульсов 490 Гц (с периодом ~2000 мкс).

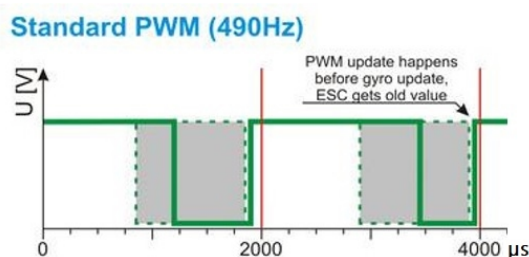


Рис. 1. Схема Standard PWM – протокол управления ESC

Для ESC, используемых в системах радиуправления (RC), длина импульса стандартного RC PWM сигнала используется в процентах. Длина импульса в 1000 мкс соответствует 0%, а 2000 мкс – 100% частоте вращения мотора. Например, если ESC должен обеспечить 50% частоты вращения мотора, он пошлет сигнал PWM длительностью 1500 мкс. Следует отметить, что PWM не синхронизирует PWM сигнал, который контроллер полета посылает ESC с работой гироскопа летательного аппарата. Поэтому обновление PWM происходит до обновления сигнала с гироскопа и ESC получает старый сигнал от контроллера полета.

OneShot125 является развитием стандартного сигнала RC PWM. OneShot125 состоит из двух частей:

- Первая часть OneShot125 синхронизирует импульсы RC (PWM сигнал, который контроллер полета посылает ESC) с выходом сигнала с гироскопа. Это позволяет ESC иметь самые актуальные последние данные из полетного контроллера без больших задержек.

- Вторая часть OneShot125, это передать на ESC самые свежие актуальные данные без задержек.

Стандартный PWM импульс находится в промежутке между 1000 и 2000 микросекундами. OneShot125 короче PWM импульса и находится в диапазоне между 125 и 250 мкс. Это означает, что ESC получает полный сигнал PWM в 8 раз быстрее. Для ESC важно иметь самые свежие данные. Полетный контроллер постоянно меняет данные для ESC на основании данных, полученных с гироскопов. Свежие актуальные без задержек данные позволяют ESC получить необходимые значения газа быстрее. Это позволяет осуществлять более точное управление, устанавливать более высокие значения PID и добиться большей стабильности особенно для гоночных квадрокоптеров.

На рис. 2 показан стандартный PWM с частотой обновления 490 Hz при ширине импульса 1000-2000 мкс. Этот PWM не синхронизируется с выходом гироскопа. В настоящее время все ESC работают с этим протоколом. PWM импульс выдается на частоте обновления равной 490 Hz.

Standard PWM (490Hz)

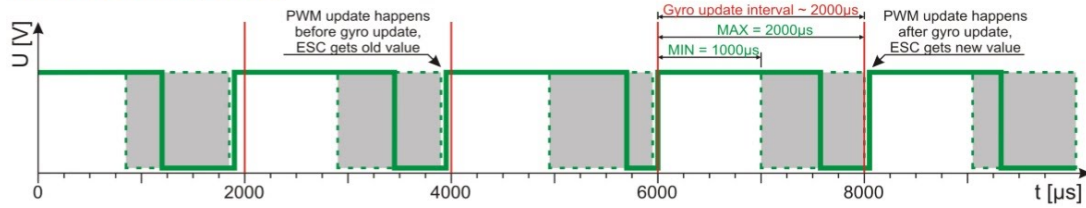


Рис. 2. Стандартный PWM для Multicopter

На рисунке 3 показан OneShot125 с частотой обновления 500 Hz и шириной импульса 125–250 μ s. Для его работы требуется ESC с поддержкой OneShot125. Свободно распространяемые прошивки BLHeli версии 13.0+, SimonK 2015-02-26 и новее поддерживают OneShot125, если их можно установить на ESC.

OneShot125 (500Hz synced to gyro)

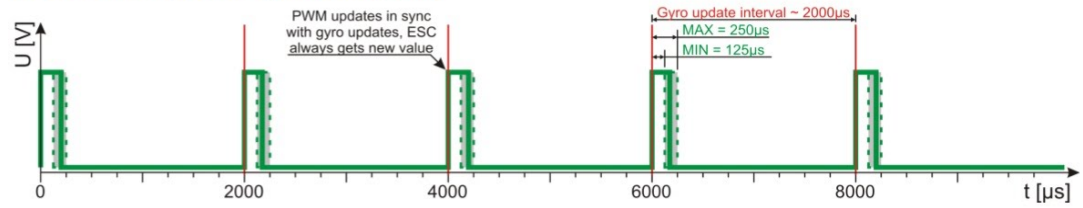


Рис. 3. OneShot125 для Multicopter

Таким образом:

- Oneshot125 устанавливает скорость таймера на выходе двигателя в 8 раз быстрее. Выходной сигнал двигателя теперь намного короче (125–250 мкс), чем исходный PWM (1000 мкс – 2000 мкс), это означает, что для отправки данных в ESC требуется меньше времени. Теперь проблема, связанная с обновлением сигнала PWM с опозданием устранена.
- Oneshot125 посылает только «один выстрел» сигнала в каждом цикле контроллера полета и делает это, как только у контроллера полета появляется новое значение для ESC.
- ESC теперь записывает новое значение в двигатель, даже до того, как FC запускает следующий цикл управления, поэтому имеет место более быстрый отклик FC и ESC. В связи с этим значение P для PID регулятора может быть немного увеличено. Отмечается более быстрым изменением скорости двигателя в соответствии с реакцией газа на пульте управления. Это важно для гоночных дронов, облетающих препятствия.

Ниже перечислены все протоколы ESC, доступные для мультикоптера, и соответствующая им ширина сигнала – время, необходимое для отправки одного пакета данных:

- Стандартный PWM (1000 мкс – 2000 мкс)	- Dshot150 (106,8 мкс)
- Oneshot125 (125 мкс – 250 мкс)	- Dshot300 (53,4 мкс)
- Oneshot42 (42 мкс – 84 мкс)	- Dshot600 (26,7 мкс)
- Multishot (5 мкс – 25 мкс)	- DShot1200 (13,4 мкс)

Протоколы Oneshot125, Oneshot42 и Multishot представляют собой аналоговые сигналы, похожие на стандартный PWM, но намного быстрее. Эти протоколы синхронизируются с циклом PID-регулятора, чтобы уменьшить дрожание, повысить производительность и уменьшить задержку между вводом данных со стика аппаратуры управления и реакцией корабля.

DShot – это новейший протокол ESC, представляющий собой цифровой сигнал. Это будущее протокола ESC, который имеет лучшую надежность и производительность, а также способности посылать на ESC не только параметры скорости двигателя, но и конкретные команды.

Аппаратное обеспечение ESC регуляторов и полетных контроллеров, выпущенное после середины 2017 года, должно поддерживать все протоколы ESC, кроме DShot1200, который является относительно новым и совместим только с некоторыми 32-разрядными ESC.

Рассмотрим аппаратную часть ESC, основой которой является микроконтроллер. Существует три основных семейства микроконтроллеров (MCU) – это Atmel, Silabs и ARM Cortex. Различные MCU имеют разные спецификации и функции, которые позволяют запускать разные прошивки.

- 8-битный ATMEL поддерживается прошивками SimonK и BLHeli ESC;
- SILABS 8-битный может работать только BLHeli или BLHeli_S;
- Atmel ARM Cortex 32-битный (точнее STM32 F0) может работать BLHeli_32.

ESC на основе ATMEL были более распространены до того, как на рынке начали доминировать SILABS. ESC Silabs, как правило, превосходят 8-битные ATMEL по производительности. В 2017 году Atmel Arm Core MCU стал использоваться для 32-битных ESC.

В ESC на основе SiLabs установлены разные процессоры, которые обеспечивают разную производительность. Наиболее используемые в настоящее время – F330 и F39X. MCU F330 имеет более низкую тактовую частоту и может иметь проблемы с работой двигателей с высоким KV. F39X не имеет этих

проблем и поддерживает протоколы Multishot и Oneshot42 для ESC.

Busybee MCU – это обновленные микроконтроллеры F330 и F39X. Прошивка BLHeli_S для ESC обычно работает на BusyBee1 - BB1 (EFM8BB10F8) и BusyBee2 - BB2 (EFM8BB21F16). Преимущество BusyBee в том, что вместо использования программного PWM, у них есть специальное оборудование для аппаратной генерации PWM-сигнала, который синхронизируется с рабочим циклом MCU, в результате получается гораздо более плавный отклик на газ аппаратуры управления. Эти микроконтроллеры поддерживают новейшие протоколы DShot ESC.

Оценивая производительность микроконтроллеров, можно записать ряд от лучшего к худшему: 1.BB2, 2.BB1, 3.F330, 4.F396, 5.Atmel 8-разрядный.

В настоящее время большинство ESC используют 8-разрядные процессоры (F330, F39X, Busybee и т. д.). Но с 2016 года начали появляться некоторые 32-разрядные ESC на основе STM32. Эти мощные 32-разрядные процессоры имеют много новых функций, которые были невозможны из-за ограниченной вычислительной мощности и возможностей 8-разрядного MCU.

Рассмотрим обновление прошивки у ESC EMAX-12A. Здесь может быть два варианта. Прошивка с помощью 3-х проводов (интерфейс C2) и по одному сигнальному проводу (требуется загрузчик), который использует ESC для подключения к полетному контроллеру. В первом варианте прошивки для указанных двух случаев в качестве адаптера связи компьютера с ESC используется Arduino Nano v3.0 с преобразователем USB-UART CH340. Во втором варианте прошивка выполняется через полетный контроллер с прошивкой cleanflight.

Для выполнения прошивки вначале необходимо загрузить на компьютер программное обеспечение с прошивками для различных ESC с сайта <https://github.com/bitdump/BLHeli> (BLHeli-master.zip) и программу для выполнения прошивки с <https://www.mediafire.com/folder/dx6kfaasyo241/BLHeliSuite> (BLHeliSuite16714901.zip).

Рассмотрим прошивку ESC по интерфейсу C2. В этом случае выводы на мотор изолируются и должна быть удалена термоусадка с ESC для напайки трех проводников к контактным площадкам ESC. На рисунке 3 показано подключение Arduino Nano к ESC.

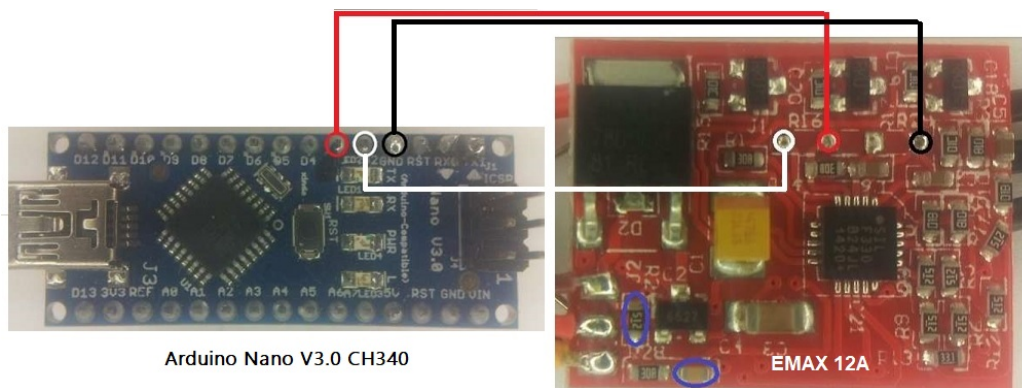


Рис. 3. Подключение Arduino Nano к ESC EMAX 12A

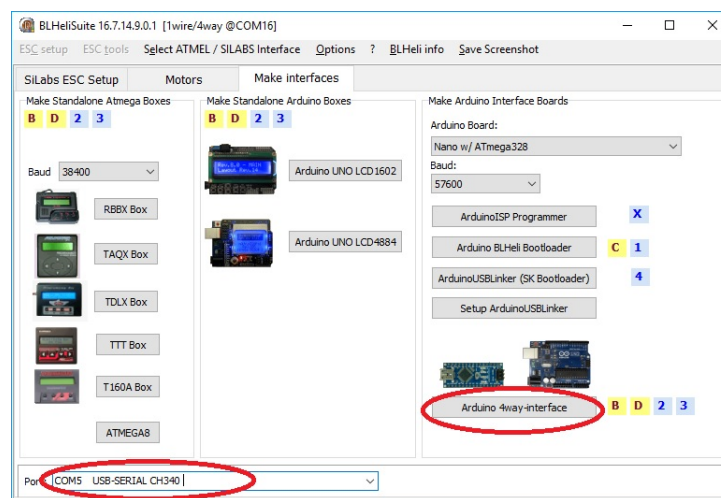


Рис. 4. Выбор интерфейса

Перед прошивкой ESC в Arduino Nano должна быть загружена программа, которая позволит Arduino выполнить процесс программирования. Для этого подключается Arduino к компьютеру через USB кабель, запускается программа BLHeliSuite.exe, выполняется переход на вкладку Make interfaces, выбирается порт и интерфейс (рис. 4).

На рис. 2 выбрана плата Arduino Nano со скоростью порта 57600. После нажатия на кнопку Arduino 4way-interface необходимо будет выбрать файл загрузки, как на рис. 5.

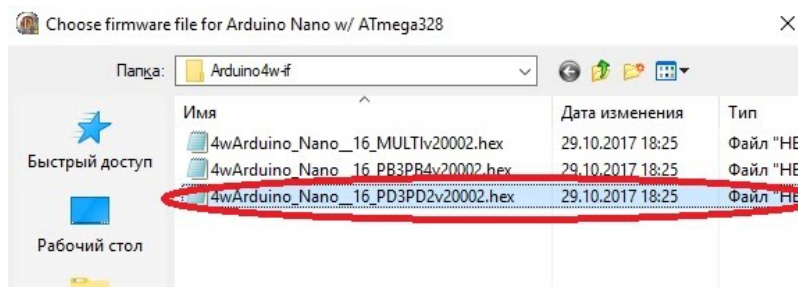


Рис. 5. Выбор файла загрузки

После выбора файла выполняется программирование Arduino. При успешной загрузке файла будет выдано соответствующее сообщение. Для загрузки прошивки необходимо перейти во вкладку Silabs ESC Setup и во вкладке Select ATMEL/SILABS Interface выбрать SILABS C2(4way-if). После этого к ESC необходимо подключить батарею и нажать на кнопку Connect.

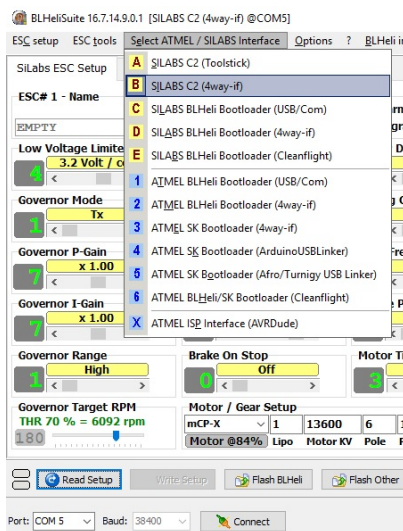


Рис. 6. Выбор интерфейса и загрузка прошивки

После успешного подключения к ESC необходимо нажать на кнопку Flash BLHeli. Далее появится окно для выбора файла прошивки. Для EMAX 12A, установленного на квадрокоптере, выбирается файл XP-12A Multi Rev.14.9. После этого выполняется прошивка и результат ее выводится на дисплей. После завершения процедуры и нажатия на кнопку Read Setup выводится обновленный экран с параметрами этой прошивки, как на рисунке 7.

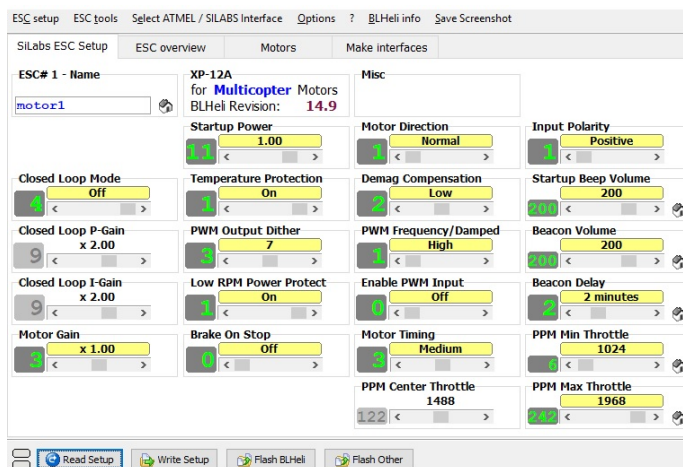


Рис. 7. Параметры прошивки

Параметры прошивки можно менять. Для их сохранения необходимо нажать на кнопку Write Setup. Если не отпаивать провода от контактных площадок, то даже после установки ESC на квадрокоптер их

можно использовать для изменения параметров или перепрошивки ESC через Arduino Nano. Однако мотор при этих действиях рекомендуется отключать.

Ниже перечислены некоторые параметры с их расшифровкой. Closed Loop Mode – режим замкнутого контура – устанавливает диапазон скоростей, с которыми может работать контур управления.

- Для High значения дроссельной заслонки от 0% до 100% линейно соответствуют заданным значениям оборотов т.е. от 0 до 200000 электрических оборотов в минуту (для 2-полюсного мотора).

- Для Middle диапазона значения дроссельной заслонки от 0% до 100% линейно соответствуют заданным значениям оборотов от 0 до 100000 электрических оборотов в минуту.

- Для Low диапазона значения дроссельной заслонки от 0% до 100% линейно соответствуют заданным значениям оборотов от 0 до 50000 электрических оборотов в минуту. Когда Closed Loop Mode Off, контур управления отключен.

Таким образом с помощью этого параметра ESC пытается управлять крутящим моментом в зависимости от текущих оборотов. Если установить HiRange, это соответствует 200 тыс. оборотов в минуту при полном открытии дроссельной заслонки. Например, если мотор 1000 KV, батарея 4S то 4,2 Вольт x 4S x 1000KV = 16.8 тыс. оборотов в минуту на полном газу на заряженных аккумуляторах. То есть нужно установить или HiRange или вовсе выключить. По умолчанию режим выключен. В этом случае при максимальной дроссельной заслонке мотор работает с максимальными оборотами для заданного напряжения.

Motor Gain – ограничивает максимальную мощность в зависимости от входного сигнала.

Startup Power – мощность импульса при старте мотора.

Temperature Protection – защита от перегрева.

PWM Output Dither – это параметр, который добавляет некоторое изменение к длительности цикла PWM отключения двигателя. Это может уменьшить проблемы (например, дискретность сигнала дроссельной заслонки или вибрации) в областях частот вращения, где частота PWM равна гармоникам частоты коммутации двигателя. Полезно в режиме активного торможения (DampedLight).

Low RPM Power Protect – если включить этот параметр, то ESC отключит мотор, если пропеллеры за что-то зацепились (мотор увяз при низких оборотах). Эта исключит пожар квадрокоптера.

Brake On Stop – при включении этого параметра выполняется резкий останов пропеллера при выключении мотора пультом управления.

Motor Direction – направление вращения мотора. Если мотор вращается не в ту сторону, необходимо изменить этот параметр.

Demag Compensation – защита от срыва синхронизации. Для небольших двигателей параметр не актуален.

PWM Frequency – частота входящего PWM-сигнала. Значение Low – около 8 кГц, High – около 20 кГц.

PWM Frequency – Damped и Damped Light – режимы торможения двигателя. Не все регуляторы имеют поддержку Damped. Это зависит от скорости работы силовых ключей регулятора.

Enable PWM input – включить PWM вход. В режиме "OFF" ESC будет ждать на входе только протокол OneShot125, а в режиме "ON" будет выбирать автоматически между OneShot и PWM.

Motor Timing – синхронизация двигателя. Low – 0 градусов, MediumLow – 8 градусов, Medium – 15 градусов, MediumHigh – 23 градуса, High – 30 градусов. Практика показывает, что если мотор на низких оборотах начинает дергаться при резком увеличении газа, то увеличивают Motor Timing.

Синхронизация двигателя, настраиваемая ESC, важна для эффективности двигателя, надежности его работы, крутящего момента и числа оборотов. Для вращения мотора пропускается электрический ток через катушку, которая создает магнитную силу и притягивает магнит ротора. Когда включается и выключается ток через катушку, происходит индукция. При получении тока катушкой, требуется время для создания магнитного поля и достижения его идеального уровня, когда ток отключается, потребуется также время, чтобы магнитное поле полностью исчезло. Целью синхронизации двигателя является раннее переключение катушки двигателя, для создания магнитного поля в нужное время. Если включить катушку раньше, когда она еще далека от магнита, это увеличит обороты двигателя, но уменьшит крутящий момент. Когда запускается катушка поздно, она находится близко к магниту, увеличивается крутящий момент двигателя, но уменьшается число оборотов.

Синхронизация двигателя во многом зависит от индукции, а индукция зависит, например, от тока, сопротивление катушки, число витков катушки и так далее. Разные двигатели будут иметь разное время индукции, и, следовательно, Motor Timing должен подстраиваться.

Input Polarity – полярность PWM сигнала. Если при нулевом газе мотор работает на полных оборотах, то меняется значение этого параметра.

Startup Beep Volume – громкость сигнала при подаче питания на квадрокоптер, издаваемая моторами.

Beacon Volume – громкость сигнала при бездействии.

Beacon Delay – задержка перед подачей сигнала бездействия.

PPM Min Throttle – минимальное значение PPM-сигнала.

PPM Max Throttle – максимальное значение PPM-сигнала.

Рассмотрим программирование (прошивку) ESC регулятора EMAX-12A по одному сигнальному проводу прошивкой BLHeli. В этом случае предыдущее программное обеспечение(прошивка) ESC регулятора должно иметь также и загрузчик. В противном случае прошивка должна быть выполнена предыдущим способом для прошивки BLHeli или как работе [13] для прошивки Simonk. Обычно современные ESC поставляются с прошивками, имеющими начальный загрузчик (bootloader) но с устаревшими версиями SimonK и BLHeli, которые могут не поддерживать протоколы OneShot. Однако даже при наличии bootloader-а ESC необходимо доработать, чтобы он мог работать с начальным загрузчиком. Например, в EMAX-12A требуется выпаять конденсатор и резистор, обведенные синим цветом на рисунке 3 (аналогично на рис. 8).

Для программирования с помощью Arduino по сигнальному проводу необходимо выполнить подключение Arduino к EMAX-12A, как на рисунке 8 (вывод D3 Arduino к сигнальному проводу ESC, GND Arduino к GND ESC).

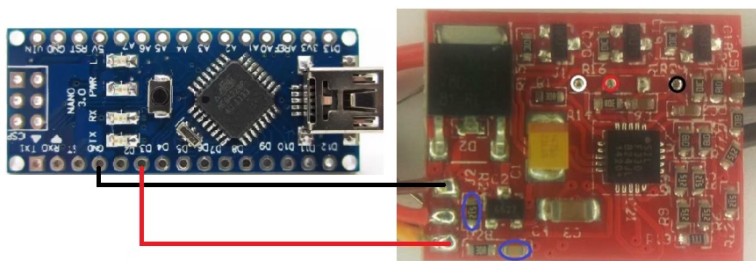


Рис. 8. Программирование с помощью Arduino по сигнальному проводу ESC EMAX-12A

Программирование Arduino Nano выполняется как в предыдущем случае по рисункам 4 и 5. Для загрузки прошивки необходимо перейти во вкладку Silabs ESC Setup и во вкладке Select ATMEL/SILABS Interface выбрать SILABS BLHeli Bootloader(4way-if). После этого к ESC подключить батарею через и нажать на кнопку Connect.



Рис. 9. Выбор интерфейса

После успешного подключения к ESC необходимо нажать на кнопку Flash BLHeli. Далее появиться окно для выбора файла прошивки. Для EMAX 12A, установленного на квадрокоптере и выбирается файл XP-12A Multi Rev.14.9. После этого выполняется прошивка и результат ее выводится на дисплей. После завершения процедуры и нажатия на кнопку Read Setup выводится обновленный экран с параметрами этой прошивки как было представлено на рис. 7.

Рассмотрим программирование (прошивка) ESC регулятора SimonK-30A по одному сигнальному проводу прошивкой SimonK (tgy_2015-09-12). В регуляторе SimonK-30A должна быть установлена прошивка с Bootloader-ом. Arduino Nano подключается к ESC как на рисунке 10. Необходимо учесть, что ESC Simonk-30A работает под управлением микроконтроллера ATMEGA-8A.

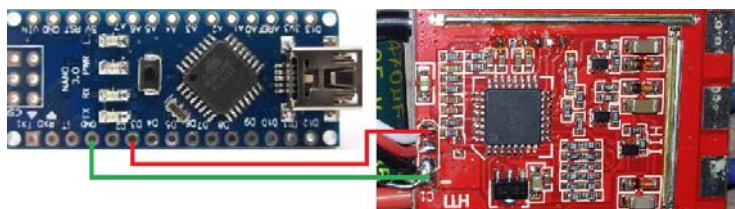


Рис. 10. Программирование с помощью Arduino по сигнальному проводу ESC Simonk-30A

Программирование Arduino Nano выполняется как в предыдущем случае по рисункам 4 и 5. Для загрузки прошивки необходимо перейти во вкладку Silabs ESC Setup и во вкладке Select ATMEL/SILABS Interface выбрать ATMEEL BLHeli Bootloader(4way-if) – рис. 11. После этого к ESC подключить батарею через и нажать на кнопку Connect.

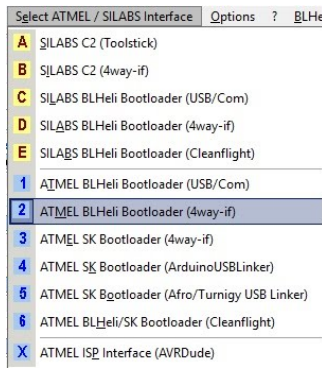


Рис. 11. Выбор интерфейса

Далее через 15–20 секунд необходимо нажать на кнопку Read Setup, после чего должно появиться окно (рис. 12).

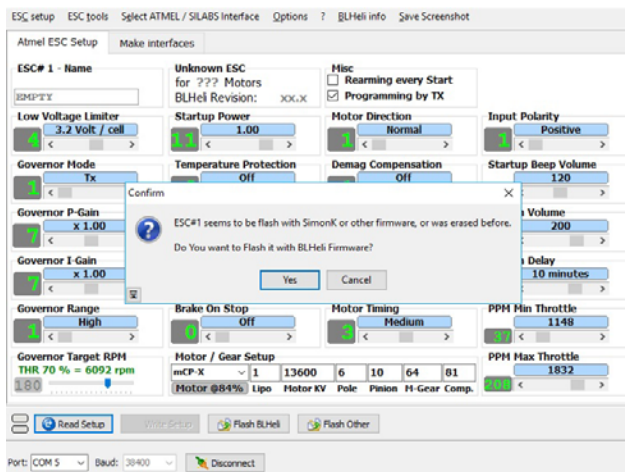


Рис. 12. Окно с идентификацией прошивки Simonk или другой неизвестной

После нажатия на кнопку Cancel, а потом на Flash Other, появиться запрос на выбор файла прошивки. Прошивку необходимо скопировать с сайта <http://0x.ca/tgy/downloads/> - файл tgy_2015-09-12_103edb5.zip и распаковать его в каталоге. Для прошивки выбирается файл tgy.hex. Далее выполняется прошивка, ход которой отображается на экране. В случае успешной прошивки появляется соответствующее сообщение. После этого ESC Simonk-30A будет поддерживать протокол OneShot125.

После установки ESC и полетного контроллера на квадрокоптер, ESC можно перепрошивать по сигнальному проводу после отключения его от полетного контроллера и переподключения к Arduino Nano. Однако перепрошивку можно делать и через полетный контроллер, если там установлена прошивка CleanFlight последних версий. Для этого вначале подключается полетный контроллер через USB к компьютеру, затем подключается к квадрокоптеру батарея и запускается программа BLHeliSuite.exe (рис. 13).

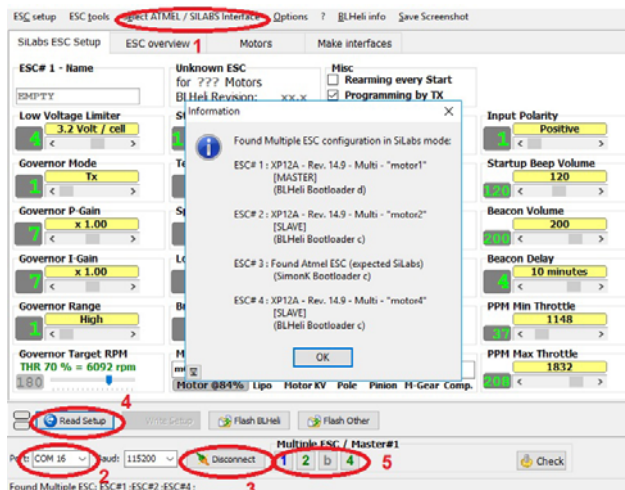


Рис. 13. Подключение ко всем ESC через полетный контроллер

Для загрузки прошивок с 4-х ESC необходимо перейти во вкладку Select ATMEL/SILABS Interface и выбрать ATMEL BLHeli Bootloader (CleanFlight) – рис. 11. На втором этапе выбирается номер порта полетного контроллера - COM 16 со скоростью 115200. На третьем этапе нажимается кнопка Connect. Примерно через 10–15 секунд нажимается кнопка Read Setup. Это приводит к чтению параметров всех ESC. 3-й ESC был определен с начальной загрузчиком Simonk, микроконтроллером Atmel и неизвестной прошивкой, остальные с прошивкой XP12A BLHeli. Выбор нужного регулятора можно выполнить в соответствии с меткой 5 рис. 13. Для выбора, например 2-го ESC необходимо нажать на кнопки не нужных ESC, например 1,4. Останется 2-й ESC, который можно перепрошить или поменять у него параметры.

В источнике [17] показано фото квадрокоптера с рамой 250 мм, у которого установлено три регулятора EMAX-12A с прошивкой XP12A BLHeli и один регулятор SimonK-30A с последней прошивкой SimonK. Полетный контроллер SP Racing F3 - Асго управляется прошивкой Cleanflight. В качестве протокола связи с ESC используется OneShot125. Тестирование квадрокоптера после установки прошивок рассмотренным выше способом показало достаточную его устойчивость в полете.

Выводы

1. Показана необходимость перепрограммирования ESC регуляторов современными прошивками, например, BLHeli или SimonK в зависимости от аппаратной части регулятора. Если регуляторы основаны на микроконтроллерах ATMEL (ATmega8a и др.) то используются прошивки BLHeli или SimonK, если используются микроконтроллеры SILABS(F330, F39X), то они прошиваются только BLHeli.

2. Показано, что протокол PWM связи полетного контроллера с ESC регулятором не синхронизируется с работой гироскопа летательного аппарата. Поэтому ESC получает старый сигнал от контроллера полета. Протокол OneShot125 синхронизирует импульсы аппаратуры управления с выходом сигнала с гироскопа. Это позволяет ESC иметь самые актуальные последние данные из полетного контроллера без больших задержек, и это стало возможным потому, что длина управляющего импульса OneShot125 в 8 раз меньше чем у PWM.

3. Показано, что прошивка SimonK способна поддерживать относительно медленные протоколы PWM и OneShot125 и в настоящее время не поддерживается. Работает только на микроконтроллерах ATMEL. Прошивка BLHeli поддерживает всю линейку высокопроизводительных современных протоколов. Она работает на микроконтроллерах ATMEL, SILABS.

4. Показана возможность использования Arduino Nano для программирования ESC EMAX-12A прошивкой BLHeli через три проводника в случае невозможности использования начального загрузчика из-за аппаратных ограничений регулятора ESC для прошивки по сигнальному кабелю. Здесь на контактные площадки ESC напаиваются три проводника, которые подключаются к Arduino. Перед прошивкой ESC Arduino предварительно программируется.

5. При аппаратной доработке ESC регулятора EMAX-12A (и других ESC из этой серии) показана возможность программирования ESC через сигнальный провод, который используется для подключения к полетному контроллеру. В этом случае программирование ведется также через Arduino Nano.

6. Рассмотрена возможность программирования ESC регулятора Simonk-30A самой последней версией прошивки SimonK через Arduino Nano по одному сигнальному проводу с помощью программы BLHeliSuite.exe.

7. Установлено, что если все ESC регуляторы (или несколько) подключены к полетному контроллеру с прошивкой CleanFlight (опробована ver.2.5.0), то ESC регуляторы можно прошивать новыми прошивками, необязательно BLHeli, а также менять параметры регуляторов, если используется прошивка BLHeli. Если используется полетный контроллер, например APM 2.6, то перепрошивку ESC можно выполнять по сигнальному проводу через Arduino, предварительно отключив ESC от полетного контроллера.

Литература

1. Paweł Sychalski. PWM, OneShot125, OneShot42, Multishot and DSHOT comparison. 2016. URL: <https://quadmeup.com/pwm-oneshot125-oneshot42-and-multishot-comparison/>.
2. Oscar Liang. WHAT IS ONESHOT ESC PROTOCOL – ACTIVE BRAKING. 2016. URL: <https://oscarliang.com/oneshot125-esc-quadcopter-fpv/>
3. Использование OneShot125 или PWMsSync. 2016. URL: <http://fpv-community.ru/applications/core/interface/file/attachment.php?id=2204>
4. Oscar Liang. WHAT IS DSHOT ESC PROTOCOL. 2017. URL: <https://oscarliang.com/dshot/>
5. Programming adapters for BLHeli. 2017. URL: <https://flyingmods.com.files.wordpress.com/2017/06/blheli-programming-adapters.pdf>
6. Oscar Liang. FLASH AND PROGRAM BLHELI ESC VIA CLEANFLIGHT – FLIGHT CONTROLLER. 2015. URL: <https://oscarliang.com/flash-esc-via-cleanflight-fc/>
7. ESCs supported by BLHeli SiLabs. 2018. URL: <https://www.mediafire.com/folder/dx6kfaasyo24l/BLHeliSuite>
8. Pin Configuration for BLHeliSuite 4-Way Interfaces (4w-if) on Arduino boards for Atmel/SiLabs ESC (v3). 2018. URL: <https://www.mediafire.com/folder/dx6kfaasyo24l/BLHeliSuite>

9. BLHeliSuite MultipleESC mode 14.3.0.2 and later. 2018. URL: <https://www.mediafire.com/folder/dx6kfaasyo24l/BLHeliSuite>
10. Operation manual for BLHeli SiLabs Rev14.x. 2018. URL: <https://www.mediafire.com/folder/dx6kfaasyo24l/BLHeliSuite>
11. Oscar Liang. HOW TO CHOOSE ESC FOR RACING DRONES AND QUADCOPTERS. 2017. URL: <https://oscarliang.com/choose-esc-racing-drones/>
12. Мясичев А. А. Перепрошивка регуляторов Hobbypower ESC-30A, Readytosky ESC-30A и Simonk 30A прошивкой Simonk. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://sites.google.com/site/webstm32/esc_reg
13. Мясичев А. А. Использование платы RobotDyn Mega2560 Pro для построения полетного контроллера гексакоптера / А. А. Мясичев // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2018. – № 3. – С. 172–180.
14. Мясичев А. А. Настройка PID регуляторов и GPS модуля для прошивки MegapirateNG полетного контроллера на базе Arduino mega2560 / А. А. Мясичев, Е. С. Ленков, В. М. Полозова // Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – Київ : ВІКНУ, 2017. – Вип. 57. – С. 143–152.
15. Мясичев А. А. Построение БПЛА на базе полетного контроллера APM 2.6 / А. А. Мясичев // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2016. – № 5. – С. 225–230.
16. Мясичев А. А. Настройка PID регуляторов для полетного контроллера на базе ARDUINO MEGA256 и прошивки MEGAPIRATENG / А. А. Мясичев // Materialy XIII mezinarodni vedecko-prakticka konference «Moderni vymozenosti vedy – 2017». - Dil 8. Technicke vedy. Fyzika. Matematika. Stavebnictvi a architektura. Modernich informacnich technologii. – Praha : Publishing House «Education and Science» s.r.o., 2017. – 86 s.
17. Мясичев А.А. Использование BLHeliSuite для прошивки ESC регуляторов SimonK 30A и EMAX Simon-12A прошивками SimonK и BLHeli. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://sites.google.com/site/webstm32/blhelisuite>, 2019.

References

1. Paweł Spychalski. PWM, OneShot125, OneShot42, Multishot and DSHOT comparison. 2016. URL: <https://quadmeup.com/pwm-oneshot125-oneshot42-and-multishot-comparison/>
2. Oscar Liang. WHAT IS ONESHOT ESC PROTOCOL – ACTIVE BRAKING. 2016. URL: <https://oscarliang.com/oneshot125-esc-quadcopter-fpv/>
3. Использование OneShot125 или PWMSync. 2016. URL: <http://fpv-community.ru/applications/core/interface/file/attachment.php?id=2204>
4. Oscar Liang. WHAT IS DSHOT ESC PROTOCOL. 2017. URL: <https://oscarliang.com/dshot/>
5. Programming adapters for BLHeli. 2017. URL: <https://flyingmodscm.files.wordpress.com/2017/06/blheli-programming-adapters.pdf>
6. Oscar Liang. FLASH AND PROGRAM BLHELI ESC VIA CLEANFLIGHT – FLIGHT CONTROLLER. 2015. URL: <https://oscarliang.com/flash-esc-via-cleanflight-fc/>
7. ESCs supported by BLHeli SiLabs. 2018. URL: <https://www.mediafire.com/folder/dx6kfaasyo24l/BLHeliSuite>
8. Pin Configuration for BLHeliSuite 4-Way Interfaces (4w-if) on Arduino boards for Atmel/SiLabs ESC (v3). 2018. URL: <https://www.mediafire.com/folder/dx6kfaasyo24l/BLHeliSuite>
9. BLHeliSuite MultipleESC mode 14.3.0.2 and later. 2018. URL: <https://www.mediafire.com/folder/dx6kfaasyo24l/BLHeliSuite>
10. Operation manual for BLHeli SiLabs Rev14.x. 2018. URL: <https://www.mediafire.com/folder/dx6kfaasyo24l/BLHeliSuite>
11. Oscar Liang. HOW TO CHOOSE ESC FOR RACING DRONES AND QUADCOPTERS. 2017. URL: <https://oscarliang.com/choose-esc-racing-drones/>
12. Mjasishhev A. A. Pereproshivka reguljatorov Hobbypower ESC-30A, Readytosky ESC-30A i Simonk 30A proshivkoj Simonk. [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : https://sites.google.com/site/webstm32/esc_reg
13. Mjasishhev A. A. Ispol'zovanie platy RobotDyn Mega2560 Pro dlja postroenija poletnogo kontrollera geksakoptera / A. A. Mjasishhev // Visnik Hmel'nic'kogo nacional'nogo universitetu. Tehnichni nauki. – 2018. – № 3. – S. 172–180.
14. Mjasishhev A. A. Nastrojka PID reguljatorov i GPS modulja dlja proshivki MegapirateNG poletnogo kontrollera na baze Arduino mega2560 / A. A. Mjasishhev, E. S. Lenkov, V. M. Polozova // Zbirnik naukovih prac' Vijs'kovogo institutu Kiivs'kogo nacional'nogo universitetu imeni Tarasa Shevchenka. – Kiiv : VIKNU, 2017. – Vip. 57. – S. 143–152.
15. Mjasishhev A. A. Postroenie BPLA na baze poletnogo kontrollera ARM 2.6 / A. A. Mjasishhev // Visnik Hmel'nic'kogo nacional'nogo universitetu. Tehnichni nauki. – 2016. – № 5. – S. 225–230.
16. Mjasishhev A. A. Nastrojka PID reguljatorov dlja poletnogo kontrollera na baze ARDUINO MEGA256 i proshivki MEGAPIRATENG / A. A. Mjasishhev // Materialy XIII mezinarodni vedecko-prakticka konference «Moderni vymozenosti vedy – 2017». - Dil 8. Technicke vedy. Fyzika. Matematika. Stavebnictvi a architektura. Modernich informacnich technologii. – Praha : Publishing House «Education and Science» s.r.o., 2017. – 86 s.
17. Mjasishhev A.A. Ispol'zovanie BLHeliSuite dlja proshivki ESC reguljatorov SimonK 30A i EMAX Simon-12A proshivkami SimonK i BLHeli. [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : <https://sites.google.com/site/webstm32/blhelisuite>, 2019.

Рецензія/Peer review : 24.2.2019 р.

Надрукована/Printed : 10.4.2019 р.

Стаття рецензована редакційною колегією

ЯДЕРНИЙ ТА ГІДРОДИНАМІЧНИЙ БАФТИНГ, ФЛАТТЕР ТА КОЛАПС В ГЕТЕРОГЕННИХ СИСТЕМАХ: ПСЕВДООПЕРАТИВНА ВИХОР-ХВИЛЬОВА ДИНАМІКА І ТОПОЛОГІЯ ЧОРНОБИЛЬСЬКОЇ ТА САЯНО-ШУШЕНСЬКОЇ КАТАСТРОФ

Встановлені фізичні механізми Чорнобильської та Саяно-Шушенської катастроф. Формальною причиною Чорнобильської катастрофи стала безглуздість затвердженої програми експерименту з вибігу турбогенератора, яка не передбачала керованих механізмів утилізації надлишкової внутрішньої енергії теплоносія після відсічення турбіни від парового потоку. Саме ця енергія дала початок формуванню некерованої вихор-хвильової структури гідродинамічного поля швидкостей, яка в подальшому каскадно підсилювалась і топологічно трансформувалась з під'єднанням відповідних структур сильного та слабого полів. В перші ж секунди після закриття стопорно-регулюючих клапанів турбіни розвинувся решітчастий флаттер твєлів та експлуатаційно зношених збірок в технологічних каналах реактора, який за 10–20 секунд переріс у сильно виражений бафтинг. Це сприяло подрібненню ядерного палива у твєлах та переходу гальмуючого ізотопу ксенону-135 (попередньо накопиченого у т.з. йодній ямі) із ядерного палива в газову фазу. Цей фактор у поєднанні з кавітаційним сповільненням нейтронів у вихор-хвильовому полі швидкостей сприяв аварійному розгону реактора на ультрахолодних нейтронах, які не реєструвались наявними системами контролю потужності реактора, розрахованими на теплові нейтрони з відносно великою довжиною вільного пробігу. Лівава частка енергії поділу ядер урану та плутонію витратилась на динамічне руйнування активної зони реактора, яке врешті завершилось струменевим викидом цієї зони в центральний зал, де внаслідок турбулентного змішування з повітрям відбулась детонація гетерогенної суміші подрібненого ядерного палива, графіту, парів та газів. В свою чергу, ця детонація активувала більш потужний механізм колапсного удару на ультрахолодних нейтронах, що захоплювались субмікронними частинками зрідженого графіту з розмірами, відповідними дебрюїлівській довжині хвилі нейтронів. При колапсі нейтронізованих крапель графіту генерувались протони та нейтрони з енергіями порядку 10–100 PeV, що обумовило колосальний рівень наведеної радіації на руїнах енергоблоку. Ефективна температура згорання графіту у локально термодинамічно-рівноважній підсистемі динамічного кооперативу складала 18000–19000 °K. Це сприяло термічній деструкції ядерного палива у вигляді діоксиду урану, в ході якої виділявся кисень, що підтримував горіння графіту. Таким чином більша частина опроміненого ядерного палива була переведена в стан плазми. Оборнений енергетичний каскад, характерний для такого роду динамічних кооперативів, обумовив перенесення енергії з епіцентру колапсного удару (в центральному залі над шахтою реактора на висоті 5–10 м над рівнем підлоги) на периферію, що сформувало комірчасту спіново-детонаційну структуру руїнацій. Активна фаза катастрофи завершилась формуванням струменевої вихор-хвильової структури, яка інтегрувалась в систему повітряних течій тропосфери Землі, обумовлюючи глобальне радіаційне забруднення планети. Величина цього забруднення на порядок перевищує офіційні дані. Такого роду катастрофічні процеси виходять за рамки існуючих фізичних концепцій та методів розрахунку ядерних енергетичних установок, що створює ризик нових катастроф в енергетиці. Відмічено, що катастрофа на СШГЕС також мала вихор-хвильову природу, однак без ядерної енергетичної накачки, що обумовило значно менший масштаб руйнувань. Розглядається колапсний механізм долому експлуатаційно ослаблених шпильок кришки турбіни другого гідроагрегату СШГЕС. Показано, що розглянута псевдокооперативна вихор-хвильова динаміка є катастрофічним виявом корпускулярно-хвильового дуалізму в макросистемах.

Ключові слова: Чорнобильська катастрофа, Саяно-Шушенська катастрофа, бафтинг, флаттер, колапс, гетерогенна система, ультрахолодні нейтрони, колапсний удар, вихор-хвильова динаміка, корпускулярно-хвильовий дуалізм.

YU. P. ZASPA
Khmelnitskyi National University, e-mail: zaspayuriy@ukr.net

NUCLEAR AND HYDRODYNAMIC BUFFETING, FLUTTER AND COLLAPSE IN HETEROGENIC SYSTEMS: PSEUDO-COOPERATIVE VORTEX-WAVE DYNAMICS AND TOPOLOGY OF CHERNOBYL AND SAYANO-SHUSHENSKAYA CATASTROPHES

The physical mechanisms of the Chernobyl and Sayano-Shushenskaya catastrophes were established. The formal cause of the Chernobyl catastrophe was the absurdity of the approved program of the turbine generator system, which did not include mechanisms used for controlled disposal of excess internal energy of the reactor coolant after the cut-off of the steam turbine flow. It was the energy that gave rise to the formation of an uncontrolled vortex-wave structure of the hydrodynamic velocity field, which later was cascaded amplified and topologically transformed with the connection of the corresponding structures of strong and weak fields. In the very first few seconds after closing the globe (stop) turbine valves the cascade flutter of the nuclear fuel element and operationally worn parts of channels of a reactor developed. In 10-20 seconds, the flutter turned into a strongly expressed buffeting. This influenced the division of nuclear fuel in the nuclear fuel elements and the transition of the stopping isotope of xenon - 135 (previously accumulated in the so-called iodine pit) from nuclear fuel to the gas phase. This factor, in addition to cavitation neutrons slowing in the vortex-wave velocity field influenced the emergency acceleration of the reactor on ultracold neutrons, which were not registered by reactor power control systems, designed for thermal neutrons with relatively large free path distance. The lion's share uranium and plutonium nuclear fission energy was spent on dynamic destruction of the reactor core, which as a result ended with the release of the jet zone in the central hall, where due to turbulent mixing with air detonation of heterogeneous mixture of crushed fuel, graphite, vapours and gases occurred. In turn, this detonation activated more powerful mechanism of collapse hit of ultracold neutrons which were up taken by submicron particles of liquid graphite with dimensions

corresponding to de Broglie neutron wavelength. With the collapse of neutron droplets of graphite, protons and neutrons were generated with energies of the 10-100 PeV range, which caused the colossal level of radiation induced on the ruins of the power unit. The effective temperature of graphite combustion in a locally thermodynamically equilibrium subsystem of a dynamic cooperative was 18000-19000 ° K. This influenced the thermal destruction of nuclear fuel in the form of uranium dioxide, during which oxygen that supported the burning of graphite was released. Thus, the bigger amount of the irradiated nuclear fuel was transferred to the plasma state. The inverse energy cascade characteristic for such kind of dynamic cooperatives led to the transfer of energy from the epicentre of collapse hit (in the main hall above the reactor well at a height of 5-10 m above the floor level) to the periphery, which formed a spin-detonation cellular structure destruction. The active phase of the disaster ended with the formation of the jet vortex-wave structure, which integrated into the system of air currents of the Earth's troposphere, causing global radiation contamination of the planet. The magnitude of this contamination is much higher than official data. Such catastrophic processes go beyond the existing physical concepts and methods of calculating nuclear power plants, which poses a risk of new catastrophes in the energy field. It was marked that the catastrophe at the Sayano-Shushenskaya Dam also had a vortex-wave nature, but without nuclear power pumping, which resulted in a much smaller scale of destruction. The collapse mechanism of the runaway of the operationally weakened pins of the turbine cover of the second hydrogenerator Sayano-Shushenskaya Dam is investigated. It is shown that the considered pseudo-cooperative vortex-wave dynamics is a catastrophic sighting of the corpuscular-wave dualism in macrosystems.

Key words: Chernobyl catastrophe, Sayano-Shushenskaya catastrophe, buffeting, flutter, collapse, heterogeneous system, ultracold neutrons, collapse hit, vortex-wave dynamics, corpuscular-wave dualism.

Вступ

Чорнобильську (26.04.1986) та Саяно-Шушенську (17.08.2009) катастрофи не прийнято ставити в один ряд. Однак, вони подібні вже у тому відношенні, що істинні фізичні механізми обох катастроф не встановлені й досі. Ці механізми виходять за рамки існуючих знань та методів розрахунку енергетичних систем. Найбільш чітко та, на жаль, трагічно, це проявляється у перехідних та ненормативних режимах, або ж наприкінці експлуатаційних кампаній в умовах зношеності обладнання. Поєднання цих факторів також характерне для обох катастроф. Врешті ж їх об'єднує псевдокооперативна вихор-хвильова динаміка, особливості якої розглядаються нижче.

Чорнобильська катастрофа

Аналіз механізмів Чорнобильської катастрофи триває вже більше трьох десятиліть і зазвичай зводиться до взаємних звинувачень конструкторів, наукового керівництва та експлуатаційників [1]. Розглянемо тут саме ті ключові моменти, що не беруться до уваги жодною із цих сторін. По-перше, це явна безглуздість самої програми експерименту з вибігу турбогенератора, ідеологічно санкціонованої генеральним конструктором реактора (НИКИЭТ) та генеральним проектувальником ЧАЕС (Гидропроект) [8]. Безглуздість підтримання т.з. власних потреб станції (у випадку максимальної проектно аварії) шляхом відсічення турбіни від парового потоку трагічно поєдналася із цілковитою відсутністю у програмі експерименту нормативів щодо керованої утилізації надлишкової внутрішньої енергії теплоносія. Професійне запитання начальника передаварійної четверної зміни реактора Ю. Ю. Трегуба (який уважно вивчив програму) “Куди приймати надлишкову потужність?” так і залишилось без відповіді зам. головного інженера ЧАЕС з експлуатації А. С. Дятлова [7, 8]. Останній у руслі прийнятих на той час традицій спланував проведення експерименту на перехідних режимах саме на кінець паливної кампанії – напередодні виведення енергоблоку на плановий середній ремонт. При цьому 75% тепловиділяючих збірок складало паливо початкового завантаження [8].

Між тим, проведені значно пізніше детальні дослідження стану такого роду відпрацьованих паливних збірок [9] свідчать про суттєве фретинг-зношування кріплень, обойм та інших контактних елементів касет, що неминуче виникає в процесі тривалої експлуатації ядерного реактора.

Все це разом узятє дало старт катастрофічному розвитку подій, коли вже через декілька секунд після закриття стопорно-регулюючих клапанів турбіни внаслідок дії різноманітних зворотних зв'язків розвинувся решітчастий флаттер паливних елементів у технологічних каналах реактора. Через 10-20 секунд він вже супроводжувався бафтингом – сильними ударами збірок об стінки каналів, частота яких падала, а потужність росла. Про це прямо свідчать (без розуміння причин появи дивних звуків, ударів, дрижання стін і підлоги) присутні на той час експлуатаційники [8].

Енергетична накачка такого роду процесів швидко змінилась з циклонічної (на фазових переходах теплоносія) на ядерну. Механізм цього переходу лежить поза компетенцією конструкторів та наукового керівництва проекту РБМК, що видно із недолугих чисельно-аналітичних розрахунків, зроблених з метою моделювання аварійних процесів [1, 2, 3, 6, 8]. В них зовсім не враховується суттєва зміна концентрації у ядерному паливі гальмуючого ізотопу ксенону-135, накопиченого на попередньому етапі короточасної зупинки реактора у т.з. йодній ямі. Бафтингові удари збірок об стінки каналів в умовах підігріву ядерного палива на потужності близько 200 МВт неминуче призводили до подрібнення паливних пігулок та переходу ксенону -135 в газову фазу, що за практичної відсутності стержнів-поглиначів в активній зоні вело до швидкого нарощування потужності ядерного поділу. Ліва частина цієї потужності йшла на динамічне руйнування реактора в процесі оберненого каскаду контактено-наведених кооперативних хвиль. Надалі тут використовується префікс “псевдо”, адже задіяне раніше словосполучення “кооперативна динаміка” [10, 11] неприйнятне по відношенню до катастроф.

Аварійний розгін реактора розпочався ще до натискання одіозної кнопки аварійного захисту АЗ-5 [1-8] і не був помічений штатними системами контролю потужності реактора. Адже внаслідок кавітаційного гальмування нейтронів у вихор-хвильовому полі швидкостей (розглядається нижче) різко посилюлась доля ультрахолодних нейтронів, переріз реакції поділу на яких, як відомо [12], зростає обернено до швидкості. В умовах згаданої вище дегазації палива ксеноном -135 це сприяло різкому нарощуванню потужності реактора. Однак, воно не фіксувалось з огляду на малу довжину вільного пробігу ультрахолодних нейтронів,

зосереджених у технологічних каналах та недоступних внутрішній, а тим більше – зовнішній системам контролю потужності реактора. Лише на завершальних секундах активної фази катастрофи було зафіксоване різке збільшення потужності (рис. 1) – за рахунок каскадного вширення спектру нейтронів. Однак, відносно незначна величина потужності реакції поділу на теплових нейтронах (в межах нормативів реактора – рис. 1) аж ніяк не відповідала руйнівному максимуму реакції на ультрахолодних нейтронах. Більше того, основна енергетична накачка катастрофи на останніх секундах її активної фази здійснювалась не за рахунок ядерного поділу, а шляхом колапсних процесів, які розглядаються нижче.

Псевдокооперативна вихор-хвильова динаміка розгону реактора описується співвідношенням [10,11]:

$$\lambda^2 / \tau = 4\pi v_{co} \cdot |\cos \theta|, \tag{1}$$

де λ , τ – довжина хвилі та характерний часовий параметр збурень, v_{co} – кооперативна в'язкість системи, θ – кут між дійсною та уявною компонентами хвильового вектору. Для динамічних систем масштабу ядерного енергоблока слід прийняти $v_{co} \approx 3 \cdot 10^5$ см²/с, що відповідає глобальній кооперативній в'язкості в системі Земля-Місяць [10, 11]. З фактичних даних щодо тиску в барабан-сепараторах (рис. 2) неважко встановити початкове значення $\tau \approx 33$ с як різницю часових максимумів тиску у 1.23.46 та 1.23.13. Це значення при $|\cos \theta| \approx 1$ відповідає довжині хвилі $\lambda \approx 120$ м, яка узгоджується з периметром теплових комунікацій реактора. При $\tau \approx 2-3$ с (від 1.23.46 (47) до 1.23.49) аналогічна оцінка дає значення $\lambda \approx 25-35$ м, що в цілому відповідає як периметру активної зони реактора, так і висоті динамічного струменевого виносу цієї зони в центральний зал – до моменту детонації. Здвоєний удар приблизно у 1.23.46(47), який відчули більшість співробітників станції [8], відповідав послідовному динамічному пошкодженню днища реактора у південно-східному квадранті [4, 5] та кріплень кришки реактора. Просторова анізотропія та локальна концентрація енергії таких барфтингових ударів вельми характерна для псевдокооперативних вихор-хвильових систем [10, 11]. Ці удари супроводжувались гідродурами в деаераторах та аварійним відкриттям всіх восьми головних запобіжних клапанів у приміщеннях барабан-сепараторів [8].

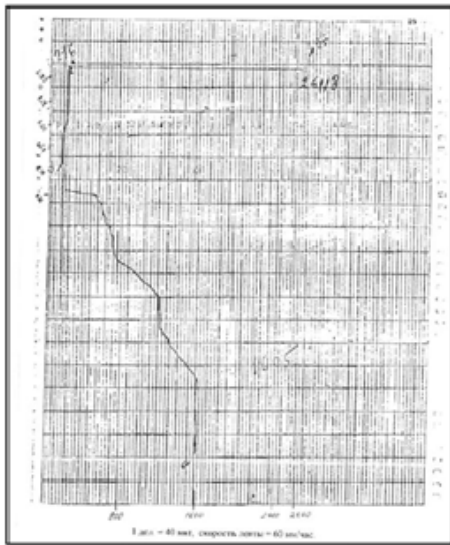


Рис. 1. Копія діаграмної стрічки з приладу “Мощность по СФКРЭ” (БЩУ-4, 26.04.86) [8]

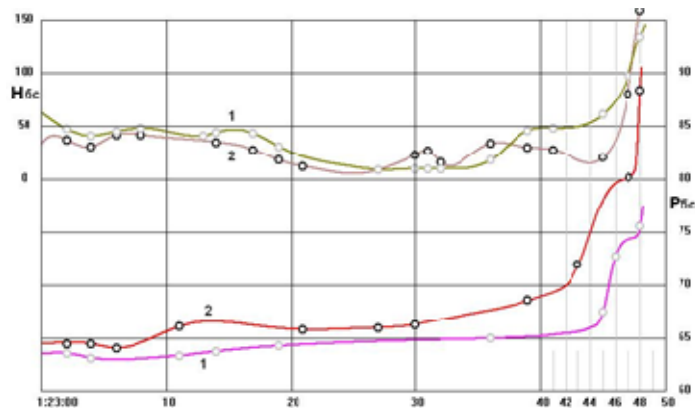


Рис. 2. Рівень H_{BC} (мм) та тиск P_{BC} (кг/см²) в барабані сепараторі: 1 – ліва половина, 2 – права половина [6]

Завершальний етап активної фази катастрофи розпочався детонацією гетерогенної суміші роздрібленого ядерного палива та графіту з парами і газами в приміщенні центрального залу орієнтовно на висоті 5-10 м над підлогою. Ця детонація, в свою чергу, стала активатором більш потужного колапсного удару на ультрахолодних нейтронах. Особливістю такого роду нестационарних процесів є наявність двох енергетично-зв'язаних підсистем: локально термодинамічно-рівноважної (для якої може бути введене поняття температури) та термодинамічно-нерівноважної (локально та глобально) вихор-хвильової підсистеми широкого діапазону часових та просторових масштабів. Суміщення в просторі та часі цих двох підсистем в єдину динамічну систему є основним каменем спотикання існуючих фізичних теорій та методів розрахунку енергетичних систем. Таке суміщення здійснюється завдяки корпускулярно-хвильовому дуалізму матерії через теплове випромінювання, а не шляхом теплопровідності.

В результаті згаданого вже колапсного удару на ультрахолодних нейтронах зруйновані приміщення енергоблоку та навколишню територію вкрила чорна сажа (кіптява), відмічена очевидцями [8, 13]. Як слідує з [14], чорний колір діоксиду урану відповідає розмірам частинок $\approx 0,05$ мкм. Це справедливо і для графіту. За законом Віна для теплового випромінювання довжина хвилі $\lambda = \pi d \approx 1,6 \cdot 10^{-7}$ м співвідноситься з температурою

$$T = \frac{b}{\lambda} \approx 18000 - 19000 \text{ } ^\circ\text{K}, \quad (2)$$

де b – постійна Віна. Настільки висока температура згорання вуглецю не могла бути забезпечена однією лишень хімічною реакцією з киснем. Основна енергетична накачка процесу йшла за рахунок колапсу зріджених частинок графіту разом із захопленими ними ультрахолодними нейтронами. Найефективніше це протікає за умови:

$$\lambda = \lambda_D = \frac{h}{mv}, \quad (3)$$

де λ_D – дебройлівська довжина хвилі ультрахолодних нейтронів, h – постійна Планка, m, v – маса та швидкість нейтрона. Швидкість захопленого нейтрона рівна швидкості краплини графіту та в середньому становить:

$$\langle v \rangle = \left(\frac{8}{\pi} \cdot \frac{kT}{M} \right)^{1/2}, \quad (4)$$

де k – постійна Больцмана, M – маса краплини:

$$M = \rho \cdot \pi d^3 / 6 \approx 1,1 \cdot 10^{-19} \text{ кг}. \quad (5)$$

Тут $\rho = 1,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ – оціночна густина реакторного графіту. Підстановка (2), (5) у (4) приводить до значення:

$$\langle v \rangle \approx 2,4 \text{ м/с}, \quad (6)$$

що відповідає характерному діапазону швидкостей ультрахолодних нейтронів [12]. В такому випадку середня дебройлівська довжина хвилі нейтронів

$$\langle \lambda_D \rangle = \frac{h}{m \langle v \rangle} \approx 1,6 \cdot 10^{-7} \text{ м}, \quad (7)$$

що замикає розрахунок, підтверджуючи таким чином запропонований фізичний механізм. Довжина хвилі (7) співвідноситься з ультрафіолетовим світлом, яке супроводжувало колапс нейтронізованих крапель графіту. Це цілком відповідає суб'єктивному враженню очевидців (із врахуванням спектральної чутливості ока): "... типу фотоспалаху" (апаратник азотно-кисневої станції Н. С. Бондаренко з відстані ≈ 200 м від четвертого енергоблоку) [13]. Синьо-фіолетове свічення над руїнами вже після активної фази катастрофи, згадане очевидцями [13], обумовлювалось остаточною іонізацією парів та газів.

За температурних максимумів (2) в епіцентрі колапсного удару відбувалась інтенсивна деструкція ядерного палива у вигляді діоксиду урану, в ході якої виділявся кисень, що підтримував горіння графіту. Це супроводжувалось переходом опроміненого ядерного палива в стан плазми, що згодом була винесена в атмосферу. При колапсі нейтронізованих крапель графіту генерувались протони та нейтрони надвисоких енергій порядку 10–100 ReV – відповідних енергії спокою частинок з масою (5). Це обумовило колосальний рівень наведеної радіації на руїнах енергоблоку. Отже, ми в цілому підтримуємо версію незалежного експерта і героїчного дослідника Чорнобиля К. П. Чечерова про ядерний характер завершального вибуху та суттєвий дефіцит опроміненого ядерного палива в об'єкті "Укриття" [5, 15]. Це вперто намагаються спростувати ядерні функціонери [4].

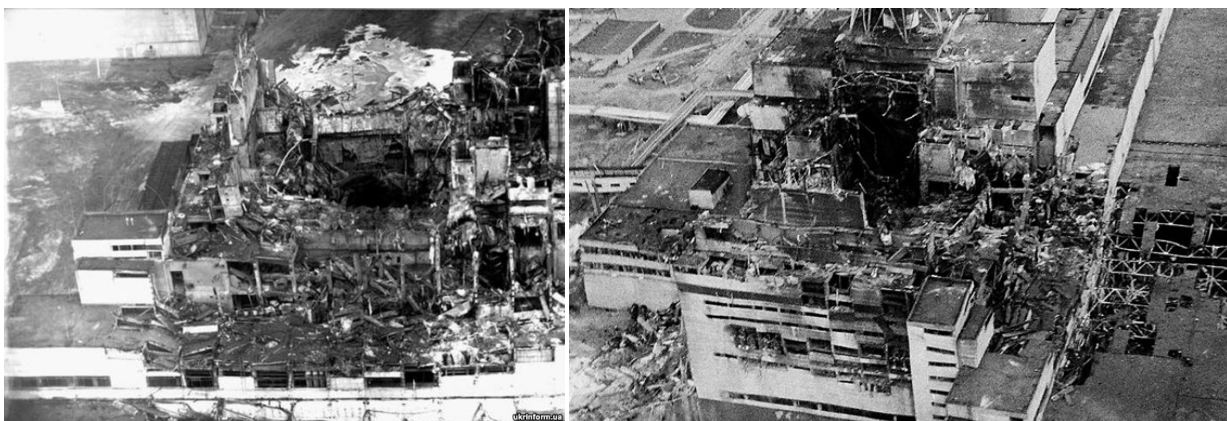


Рис. 3. Руїни Чорнобильської катастрофи

В процесі надзвукового поширення вихор-хвильової детонаційної структури з епіцентру колапсного удару на периферію вона суттєво підсилилась за рахунок енергії конденсації водяної пари в приміщеннях барабан-сепараторів, накопиченої в результаті аварійного відкриття всіх восьми головних запобіжних клапанів. Це обумовило комірчасту структуру та просторову анізотропію руйнувань – переважно на північ та на південь – рис. 3. Екрануючий ефект кришки реактора та хвилеводний ефект центрального залу забезпечили, відповідно, відносну цілісність західної стіни енергоблоку та значний масштаб руйнувань на схід від епіцентру (рис. 3).

Топологія катастрофи в цілому узгоджується з механізмами пульсуючої та спінової детонації [16]. В рамках моделей [10-11] ця топологія описується мінімізацією магнітно-сильної та магнітно-слабкої енергії поля, а також гідродинамічної енстрофії – за умов збереження спінової спіральності полів у локалізованих областях D простору:

$$\left| \int_D \varepsilon \cdot dV_D \right| \geq \left| \int_D h_{sv} \cdot dV_D \right| \quad (8)$$

$$\varepsilon = \frac{(\text{rot} \vec{V})^2}{2}, \quad h_{sv} = \frac{i\omega(\vec{V})^2 \cdot (\vec{k} \cdot \vec{r})}{v_{co}} = \frac{(\vec{\nabla} \vec{V}) \cdot (\vec{V})^2 \cdot (\vec{k} \cdot \vec{r})}{v_{co}} \quad (9, 10)$$

Тут ε, h_{sv} – відповідно густини енстрофії та спінової спіральності, \vec{V} – вектор-потенціал полів з розмірністю швидкості, ω, \vec{k} – циклічна частота та хвильовий вектор окремої моди, \vec{r} – радіус-вектор, i – уявна одиниця. Магнітна компонента енергії вихор-хвильової структури сильного, слабого та гідродинамічного полів характеризується об’ємною густиною [11]:

$$w_m = \frac{c^2 \cdot (\text{rot} \vec{V})^2}{8\pi\mu g}, \quad (11)$$

де c – швидкість світла у вакуумі, μ – аналог магнітної проникності середовища, g – калібрувальна константа з розмірністю сталі всієї системи та визначається всіма доступними джерелами енергії – в даному випадку – руйнівними. Як слідує з (10), невід’ємною умовою утворення такого роду топологічних структур є стискуваність середовища (дивергентність поля швидкостей), в якому вони поширюються. Даний розгляд можливий лише в комплексному розширенні дійсного Евклідового простору, що виходить за рамки існуючих на-сьогодні фізичних концепцій [11].

Активна фаза Чорнобильської катастрофи завершилась формуванням вертикальної вихор-хвильової стуменової структури, що цілком інтегрувалась в систему повітряних течій тропосфери Землі та обумовила глобальне радіаційне забруднення планети. Величина цього забруднення на порядок перевищує офіційні дані [4].

Наведена тут фізична схема розвитку катастрофи узгоджується з відомими результатами післяаварійних досліджень (за вже згадуваними виключеннями). Зокрема, наявність паливовмісних скломас у підреакторних приміщеннях з найрізноманітнішими за морфологією включеннями [14] підтверджує відмічену вище динамічну, топологічну та енергетичну взаємопов’язаність двох підсистем: локально-рівноважної та нерівноважної. Згадана вище дегазація опроміненого ядерного палива ксеноном-135 підтверджується мікрофотографіями паливних частинок у Чорнобильських викидах – рис. 4, 5. Опущання нижньої плити реактора на 3-4 м [4, 5], вочевидь, відбулось на етапі струменевого винесення активної зони в центральний зал.



Рис. 4. Мікрофотографія паливної частинки з явно вираженою пористістю, яка виникла в процесі інтенсивної дегазації ядерного палива [4]

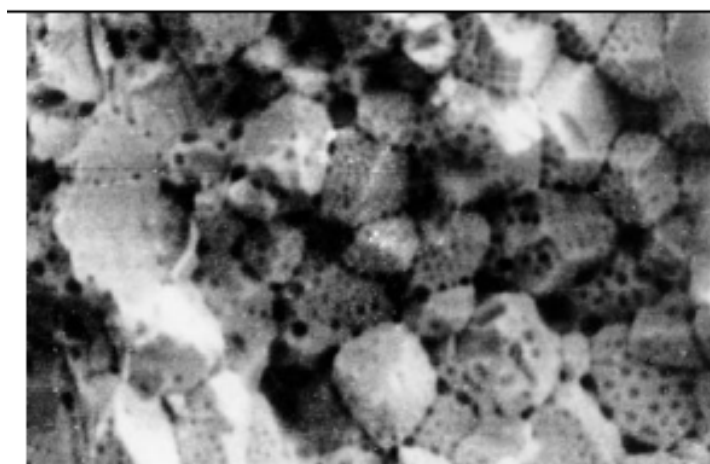


Рис. 5. Мікроблочна пориста структура паливної частинки з периферійних ділянок твєлів: розмір мікроблоків $\approx 2-18$ мкм, розмір пор $\approx 0,5 - 1,5$ мкм [14]

Дослідження вмісту характеристичних ізотопів ксенону у Чорнобильських викидах, проведені спеціалістами Радієвого інституту ім. В. Г. Хлопіна [17] у м. Череповець (1000 км від Чорнобиля) одразу після катастрофи, виявили суттєве відхилення відношення цих ізотопів від величини, характерної для нормативних режимів роботи ядерних реакторів. Це було розцінено як підтвердження миттєвого ядерного енерговиділення з енергетичним внеском $\sim 0,01 - 0,1\%$ від наявного загального запасу палива в реакторі [17]. Однак, ці та більш пізні [18] розрахунки проводились на основі традиційної схеми поділу ядер урану та плутонію на теплових нейтронах, що врешті привело до хибної інтерпретації Чорнобильської катастрофи як

результату локального ядерного вибуху в одному, або ж декількох технологічних каналах [17,18].

Саяно-Шушенська катастрофа

Окремі аспекти цієї катастрофи вже аналізувалися нами раніше в контексті контактної динамо [10]. Вихор-хвильова динаміка тут також описується співвідношенням (1). Характерні часові параметри неважко визначити із сейсмограм катастрофи (рис. 6) та з відповідних спектрів (рис. 7). На сейсмограмах чітко проявлений обернений енергетичний каскад псевдокооперативних хвиль із характерними періодами: ≈ 1 с, $\approx 6-7$ с, ≈ 20 с. Ці періоди згідно (1) при $v_{co} \approx 3 \cdot 10^5$ см²/с, $|\cos \theta| \approx 1$ відповідають наступним довжинам хвиль λ вихор – хвильових конфігурацій поля швидкостей: ≈ 19 м, ≈ 50 м, ≈ 185 м. Перша величина співпадає з периметром відсмоктуючої труби у затурбінному відділенні [19], друга близька до периметру спіральної камери, третя – до сумарного периметру спіральної та турбінної камер. Разом вони описують псевдокооператив структур, що стали справжнім прокляттям СШГЕС з часів її освоєння та введення в експлуатацію [19]. Ці структури у ненормативних другій та четвертій зонах роботи гідроагрегатів СШГЕС проявляли себе високим рівнем низькочастотних вібрацій турбінного підшипника (обернений бафтинговий каскад на спектрі рис. 8а) та високочастотними флаттерними коливаннями лопаток конструктивно слабкого направляючого апарату (рис. 8б, прямиий каскад) [20]. Бафтинговий діапазон частоти $\approx 0,4 - 0,5$ Гц традиційно пов'язувався з ударами вихорового джгута об стінки відсмоктуючої труби [19] та з приєднанням до цих стінок завихореного відриву потоку з лопатей турбіни [21].

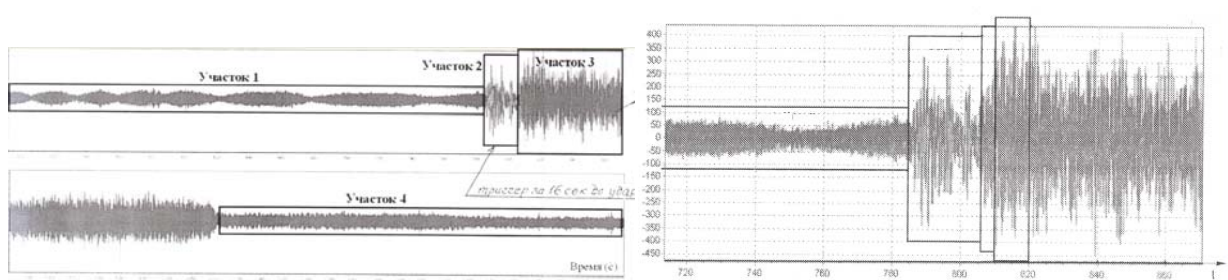


Рис. 6. Сейсмограми Саяно-Шушенської катастрофи [23, 24]

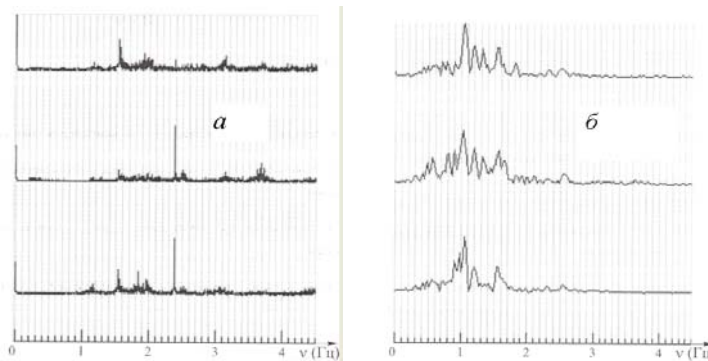


Рис. 7. Спектри сейсмограм до катастрофи (а) та на першому етапі катастрофи (б) [24]

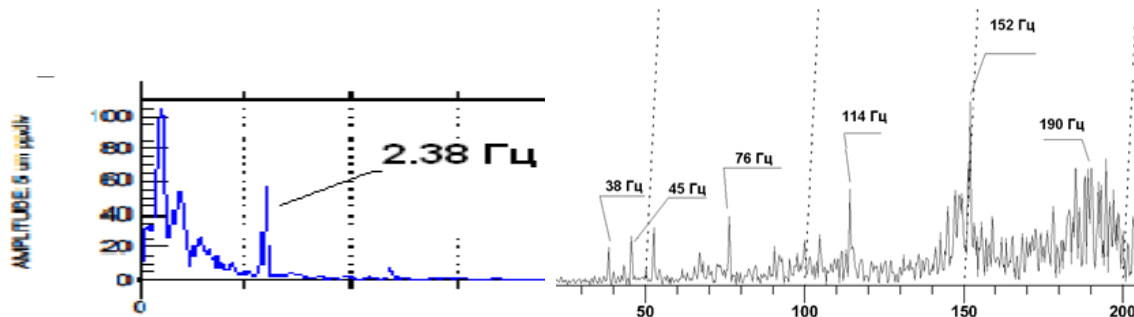


Рис. 8. Амплітудно-частотні спектри вібросигналів з корпусу турбінного підшипника (зліва) та з лопаток направляючого апарату (справа) гідроагрегату СШГЕС [20]

Таке приєднання зовсім не описується розробленими після катастрофи чисельно-аналітичними методами [22]. Між тим, саме воно обумовлює специфічне контактне “спотикання” потоку на стінках відсмоктуючої труби у другій та четвертій зонах роботи, яке передається вгору та дестабілізує весь потік. При цьому суттєву роль відграють кавітаційні процеси – як на лопастях турбіни, так і на стінках відсмоктуючої труби.

Однак, як видно з порівняння спектрів на рис. 7б та рис. 8а, під час катастрофи сталися певні топологічні зміни вихор-хвильової структури поля швидкостей: замість основної частоти $\approx 0,4 - 0,5$ Гц домінуючою стала її друга гармоніка, вельми близька до частоти основної моди радіальних коливань

плотини СШГЕС при максимальному на час катастрофи напорі ($\approx 1,15$ Гц) [10]. Ця близькість, по суті, стала фатальною, об'єднуючи в єдиний динамічний псевдокооператив вже не тільки водяний тракт ГА-2, але й усю плотину разом з уміщуючим геологічним середовищем. Відмічені вже зони D концентрації завихореності та спінової спіральності поля швидкостей припадали у т.ч. на тектонічні розломи під фундаментом гідроагрегатів [10, 23], а також на ослаблені в процесі тривалої експлуатації шпильки кришки турбіни другого гідроагрегату. До закінчення нормативного 30-літнього терміну експлуатації він не допрацював всього два місяці.

Механізм злому цих шпильок, а також злому верхніх цапф лопаток направляючого апарату ГА-2 неодноразово розглядався в останні роки [20, 21, 24–27]. Однак, зазвичай не береться до уваги комплексний характер цих руйнівних процесів. Фатальна тріада бафтинг-флаттер-колапс згідно (1) охоплювала діапазон просторових масштабів близько восьми порядків величини та відповідний діапазон часових масштабів близько шістнадцяти порядків величини. Верхні межі цих діапазонів забезпечувались колапсними процесами мікронних просторових та мікрохвильових частотних масштабів. На рис. 9 наведені фотографії зломів на шпильках кришки турбіни та на верхніх цапфах лопаток направляючого апарату (НА) аварійного другого гідроагрегату. Фіолетово-синій колір поверхневих оксидних плівок, якими вкриті ці деталі, свідчить про розігрів до температур близько 300°C (вуглецева конструкційна сталь -35 шпильок [25, 26]) та близько 600°C (легована кавітаційностійка сталь 10X12НДЛ лопаток направляючого апарату [27]). Ці температури напряму пов'язані з псевдокооперативним механізмом злому. Відмітимо, що площа розкритих втомних тріщин на зломах цапф (рис. 9б) не перевищує 5 – 10%, в той час, як на зломах шпильок (рис. 9а) вона в середньому становила 65% [25]. Це підтверджує суттєву роль втомних пошкоджень шпильок у механізмі аварії. Однак, наявність високих температур як на шпильках, так і на цапфах, свідчить про їх спільне походження. Дисипація ентропії (9), спіральності (10) та енергії (11) на поверхнях втомних тріщин дає старт аварійному зростанню температури у прилеглих шарах матеріалу. Це різко інтенсифікує процес термогенерації дефектів кристалічної структури. Внаслідок корпускулярно-хвильового дуалізму цих дефектів вони захоплюються вихор-хвильовими формами поля швидкостей та врешті стікають на поверхні втомних тріщин та на границі зерен металу. Колапс такого роду структур на цих поверхнях та границях супроводжується виділенням енергії, яка йде на подальше розкриття тріщин та врешті – на долом матеріалу. Вирішальну роль у такому доломі поряд із колапсом відіграють також низькочастотний бафтинг та середньочастотний флаттер. Вони забезпечують високий рівень загального динамічного навантаження у всій системі. Як видно із сейсмограм катастрофи (рис. 6), крихкий колапсний долом кріплення кришки турбіни ГА-2 стався на третьому підряд бафтинговому ударі. Ці удари слідували з періодом $\approx 6\text{--}7$ секунд та включали флаттерні субперіоди близько секунди. Колапсний долом кріплення виразно проявив себе голосним акустичним хлопком, який чули робітники станції безпосередньо перед викидом стовпа води в районі ГА-2 у машинному залі [25].



Рис. 9. Фотографії зламаних шпильок кришки турбіни [26] (зліва) та зламаних верхніх цапф лопаток направляючого апарату [27] (справа) другого гідроагрегату СШГЕС

Наведено деякі математичні співвідношення щодо цих фізичних механізмів:

$$x \cdot e^x - 5 \cdot (e^x - 1) = 0, \quad b = \frac{hc}{4,965 \cdot k} \tag{12, 13}$$

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{b}{T}, \quad v = \left(\frac{2kT}{M} \right)^{1/2} = \frac{hT}{mb} = \frac{4,965 \cdot kT}{mc} \tag{14, 15}$$

$$M = \frac{2}{kT} \cdot \left(\frac{mc}{4,965} \right)^2, \quad \frac{Mc^2}{mc^2} = \frac{2}{(4,965)^2} \cdot \frac{mc^2}{kT} \gg 1 \tag{16, 17}$$

$$\rho = \frac{59,58}{ch^3} \cdot (\pi mkT)^2, \quad T = \frac{(\rho ch^3 / 59,58)^{1/2}}{\pi mk} \quad (18, 19)$$

Тут 4,965 – корінь трансцендентного рівняння (12) для визначення постійної Віна [12]; λ – дебройлівська довжина хвилі захоплених дефектів кристалічної структури; v – швидкість цих дефектів, що приймається рівною найбільш ймовірній тепловій швидкості вихор-хвильових структур поля швидкостей з ефективною масою M ; m – ефективна маса дефектів; ρ – ефективна густина вихор-хвильових структур; h , k – постійні Планка та Больцмана; c – швидкість світла у вакуумі; T – абсолютна температура. Приймаючи за m масу міжвузлових атомів ґратки заліза ($m \approx 56$ а.о.м.) та за ρ – типову густину сталі ($\rho \approx 7,8 \cdot 10^3$ кг/м³), з (19) отримаємо значення абсолютної температури матеріалу $T \approx 800^\circ$ К, яке близьке до величин, розглянутих вище. За цих умов із (14,15,16) слідує: $v \approx 2$ мм/с, $M \approx 5 \cdot 10^{-15}$ кг, $\lambda \approx 3,6$ мкм. Отримана величина λ добре узгоджується з мікронними масштабами границь зерен та частково розкритих втомних тріщин, на яких колапсують дефекти кристалічної структури, захоплені вихор-хвильовими формами поля швидкостей. Відмітимо врешті певні топологічні аналогії, характерні для завершальних стадій активних фаз Чорнобильської та Саяно-Шушенської катастроф. Відносно повільне підймання ротора ГА-2 СШГЕС після зриву кріплень кришки турбіни врешті завершилось його струменевим винесенням в машинний зал (рис. 10), що до болю нагадує сценарій Чорнобильської катастрофи.



Рис. 10. Руїни Саяно-Шушенської катастрофи

Колапсні процеси на початковій стадії активної фази Чорнобильської катастрофи

Повертаючись до механізмів Чорнобильської катастрофи, використаємо співвідношення (12–19) для конкретизації цих механізмів щодо процесів колапсу. Передусім відмітимо недифузний вихор-хвильовий механізм транспортування дочірніх продуктів поділу ядер урану та плутонію на поверхню та у міжзеренний простір кристалів ядерного палива у вигляді діоксиду урану UO_2 . У якості температурного параметра візьмемо середнє арифметичне з аварійних трендів температури води на вході в активну зону ($\approx 200^\circ$ С) та на зворотному підході води до головних циркуляційних насосів ($\approx 282^\circ$ С) [6]. В абсолютних одиницях це середнє становитиме $T \approx 514^\circ$ К. Підставляючи це значення у (18) при $\rho \approx 10 \cdot 10^3$ кг/м³ (експлуатаційне опромінене ядерне паливо [14]), отримаємо: $m \approx 102$ а.о.м., що відповідає ізотопам рутенію Ru та родію Rh . Саме ці ядра поряд із іншими елементами середньої частини таблиці Менделєєва найчастіше присутні у міжзеренному просторі паливних решток Чорнобильських викидів [14]. Із (14) слідує величина $\lambda \approx 7$ мкм, яка добре узгоджується з типовим масштабом блочної структури периферійних зразків опроміненого палива – рис. 5. Власне для ксенону-135, який згадувався на початку, оптимальна температура вихор-хвильового транспортування на поверхню дещо нижча: $T \approx 390^\circ$ К. Однак, в аварійному випадку швидкість недифузного вихор-хвильового транспортування цього гальмуючого ізотопу на поверхню була цілком достатньою для розгону реактора на ультрахолодних нейтронах.

Як виявилось, початкова стадія такого розгону забезпечувалась колапсом нейтронізованих кавітаційних каверн теплоносія у технологічних каналах реактора. При $T \approx 514^\circ$ К, $m \approx 1$ а.о.м. (нейтрон) із (18) отримуємо значення ефективної густини речовини (та поля одночасно) у кавернах: $\rho \approx 0,9$ кг/м³. Із (14) маємо: $\lambda \approx 5–6$ мкм як ефективний периметр каверни, що відповідає діаметру каверни $d \approx 1,8$ мкм. Колапс цих нейтронізованих каверн на стінках твєлів забезпечив початковий розгін реактора на ультрахолодних нейтронах. Швидкість останніх, як слідує з (15), становила $v \approx 0,07$ м/с, що характерно для ультрахолодних нейтронів [12]. Ефективна маса нейтронізованих каверн складала величину $M \approx 3 \cdot 10^{-18}$ кг.

На останніх секундах існування активної зони в шахті реактора характер колапсу суттєво змінився в зв'язку з цілковитим переходом теплоносія у парову фазу. Використаємо наступні співвідношення:

$$\rho = \frac{p \cdot m^*}{kT}, \quad T = \frac{h}{k} \cdot \left(\frac{p \cdot m^* \cdot c}{59,58 \cdot (\pi m)^2} \right)^{1/3} \quad (20,21)$$

Тут p – тиск пари, m^* – маса молекул води. Останньою точкою на аварійних трендах тиску в барабан-сепараторах був тиск 90 атм. – рис. 2. За цих умов при $m^* = 18$ а.о.м., $m \approx 1$ а.о.м. із (21) маємо: $T \approx 1750$ °К. Тоді з (20) слідує: $\rho \approx 10$ кг/м³. При цьому з (18) отримуємо: $\lambda \approx 1,7$ мкм, або ж $d \approx 0,5$ мкм – довжину хвилі та ефективний діаметр нейтронізованих парових вихор-хвильових конфігурацій поля швидкостей. Ефективна маса таких конфігурацій становить: $M \approx 9 \cdot 10^{-19}$ кг, а швидкість – $v \approx 0,2$ м/с.

У розрахунках [3] приймається, що розплавлення паливних пігулок та руйнування паливних збірок відбувається за умови перевищення середньої по перерізу твела температури у 3300 °К. Як слідує з цих розрахунків, в умовах розгону реактора на теплових нейтронах таке перевищення за наявності на початку катастрофи концентрації ксенону-135 могло статись лише у локальній частині активної зони реактора та в обмеженому числі паливних збірок (близько 200 із ≈ 1700 наявних). Залишимо ці результати на совісті недолугих конструкторів та обмеженого наукового керівництва проекту РБМК [3]. Справа тут, як уже відмічалось, зовсім не в теплових, а в ультрахолодних нейтронах. Як слідує з (21), відмічене перевищення температури досягається колапсним механізмом при тиску p водяної пари у технологічних каналах близько тисячі атмосфер. Це повністю руйнує активну зону реактора на останній секунді активної фази катастрофи, виносить цю зону в центральний зал, де й відбувається, як описано на початку, остаточний колапсний удар на нейтронізованих краплях графіту.

Корпускулярно-хвильовий дуалізм в макросистемах

Зазвичай вважається, що корпускулярно-хвильовий дуалізм характерний лише для мікросистем – фактор маси в знаменнику (3). Однак, як видно, там присутній і фактор швидкості: при $v \rightarrow 0$ дебройлівська довжина хвилі λ_D стає невизначено великою. Якщо сповільнення в часі окремих елементів поля швидкостей будуть не хаотичними (як у локально термодинамічно-рівноважних системах), а скорельованими (кооперативними), то λ_D може бути макроскопічною. В такому випадку матеріальна система описується вже не як сукупність парних взаємодій на основі динаміки Ньютона (або ж локальних квантових теорій поля [12]), а як нелінійна система вихор-хвильових форм фундаментальних полів, що взаємодіють кооперативно [11]. Трагічним є те, що на оберненій стороні цієї медалі викарбувані імена та дати катастроф.

Висновки

Вище були розглянуті лише формальні механізми Чорнобильської та Саяно-Шушенської катастроф. Аналіз глибинних причин цих катастроф виходить не тільки за рамки даної роботи, але й за межі фізики як такої. Наведемо лише кінцевий результат: Чорнобиль – це трагедія не тільки України, Білорусі, чи то СРСР – це трагедія людства, яке знаходиться в заручниках у добре відомого автора сценаріїв такого роду катастроф і жертвоприношень. Альтернатива одна: в укріпленні Християнської моралі.

Література

1. Информация об аварии на Чернобыльской АЭС и ее последствиях, подготовленная для МАГАТЭ (INSAG-1) [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://magate-1.narod.ru/>
2. Анализ причин аварии на Чернобыльской АЭС путем математического моделирования физических процессов. Отчет ВНИИАЭС [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://accident.ru/WREPO.html>
3. Абагян А. А. Расчетный анализ начальной стадии аварии на Чернобыльской АЭС / А. А. Абагян, И. М. Аршовский, В. М. Дмитриев и др. // Атомная энергия. – 1991. – Т. 71, № 4. – С. 275–287.
4. Арутюнян Р. В. Ядерное топливо в объекте “Укрытие” Чернобыльской АЭС / Арутюнян Р. В., Большов Л. А., Боровой А. А., Велихов Е. П., Ключников А. А. – М. : Наука, 2010. – 240 с.
5. Новосельский О. Ю. Технические аспекты аварии на 4-м энергоблоке Чернобыльской АЭС: Препринт ФГУП НИКИЭТ ЕТ-05/70 / Новосельский О. Ю., Черкашов Ю. М., Чечеров К. П. – М. : Изд-во “ГУП НИКИЭТ”, 2005. – 27 с.
6. Дмитриев В. М. Причины Чернобыльской аварии известны [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://accident.ru/datas.html>
7. Дятлов А. С. Чернобыль. Как это было [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.gtc2.ru/book/index.html>
8. Карпан Н. В. Чернобыль. Месть мирного атома [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://physiciansofchernobyl.org.ua/rus/book/Karpan.html>
9. Сухих А. В. Топливо канальных кипящих реакторов большой мощности / Сухих А. В., Сагалов С. С., Павлов С. В. – Дмитровград : Изд-во АО “ГНЦ НИИАР”, 2016. – 185 с.
10. Заспа Ю. П. Контактне динамо як генератор когерентних (кооперативних) космічних форм руху та джерело планетарної, сонячної, галактичної і метagalacticної енергії та електромагнетизму. Частина VIII / Ю. П. Заспа // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2017. – № 5. – С. 226–239.
11. Заспа Ю. П. Кооперативна динаміка, взаємодукція, комплексна топологія та гіперкомплексна

хронологія вихор-хвильових форм електромагнітного, гравітаційного, сильного і слабого, а також гідродинамічного полів проти хибних стандартів SM та Λ CDM / Ю. П. Заспа // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2019. – № 1. – С. 254–266.

12. Физическая энциклопедия : в 5 т. / под ред. А. М. Прохорова. – М. : Большая росс энц., 1999. – 760 с.

13. Свидетельства очевидцев Чернобыльской аварии [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://accident.ru/evid02.html>

14. Савоненков В. Г. Радиологическое исследование топливосодержащих новообразований, возникших в результате аварии на Чернобыльской АЭС / В. Г. Савоненков, Е. Б. Андерсон, Е. А. Смирнова, С. И. Шабаяев // Труды Радиового института им. В.Г. Хлопина. – 2009. – Т. XIV. – С. 87–117.

15. Чечеров К. П. Взрыв был один, и он был ядерный [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.novayagazeta.ru/articles/20011/04/21/5877-vzryv-by-odin-i-on-by-ya-dernyy>

16. Денисов Ю. Н. Механизм детонационного сгорания / Ю. Н. Денисов, Я. К. Трошин // ПМТФ. – 1960. – № 1. – С. 21–35.

17. Пахомов С. А. Оценка величины мгновенного энерговыделения при аварии реактора на ЧАЭС / С. А. Пахомов, Ю. В. Дубасов // Труды Радиового института им. В. Г. Хлопина. – 2009. – Т. XIV. – С. 79–86.

18. De Geer L.-E. A Nuclear jet at Chernobyl Around 21:23:45 UTC on April 25, 1986 / L.-E. De Geer, C. Persson, H. Rodhe // Nuclear Technology. – 2018. – V. 201, № 1. – P. 11–22.

19. Брызгалов В. И. Из опыта создания и освоения Красноярской и Саяно-Шушенской гидроэлектростанций / Брызгалов В. И. – Красноярск : Изд. дом “Суриков”, 1999. – 561 с.

20. Клюкач А. А. Влияние асимметрии спиральной камеры на вибрации гидроагрегата [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.plotina.net/experts/klukach>

21. Клюкач А. А. О вибрации на агрегате № 2 СШГЭС до аварии. Дискуссии [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://tayga.info/details/2011/02/02/~102283>

22. Бабаченко Ю. В. Расчетное исследование радиальных сил, действующих на ротор радиально-осевой гидротурбины / Ю. В. Бабаченко, А. Ю. Авдюшенко // Известия Самарского научного центра РАН. – 2013. – Т. 15, № 4(2). – С. 547–552.

23. Марчук А. Н. Геологические и геодинамические аспекты в комплексе причин аварии на Саяно-Шушенской ГЭС / А. Н. Марчук // Гидротехническое строительство. – 2012. – № 1. – С. 48–57.

24. Лобановский Ю. И. Гидроакустический бустинг – способ возбуждения катастрофических автоколебаний в напорной системе Саяно-Шушенской ГЭС [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://synerjetics.ru/article/busting.htm>

25. Акт технического расследования причин аварии, произошедшей 17 августа 2009 года в филиале Открытого Акционерного общества “РусГидро” – “Саяно-Шушенская ГЭС имени П. С. Непорожного”. – М. : Ростехнадзор, 2009. – 50 с.

26. Рассохин Г. О разрушении узла крепления крышки турбины гидроагрегата № 2 СШГЭС [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.plotina.net/sshges-rassokhin-4/>

27. Бикол. Частное Расследование технических причин аварии гидроагрегата № 2 Саяно-Шушенской ГЭС [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://samlib.ru/b/boris-i-k/sajanges-rassledovanie.shtm/>

References

1. Informacija ob avarii na Chernobyl'skoj AJeS i ee posledstvijah, podgotovlennaja dlja MAGATJe (INSAG-1) [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu : <http://magate-1.narod.ru/>

2. Analiz prichin avarii na Chernobyl'skoj AJeS putem matematicheskogo modelirovanija fizicheskikh processov. Otchet VNIAJeS [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu: <http://accident.ru/WREPO.html>

3. Abagjan A. A. Raschetnyj analiz nachal'noj stadii avarii na Chernobyl'skoj AJeS / A. A. Abagjan, I. M. Arshovskij, V. M. Dmitriev i dr. // Atomnaja jenergiya. – 1991. – Т. 71, № 4. – С. 275–287.

4. Arutjunjan R. V. Jadernoe toplivo v ob#ekte “Ukrytie” Chernobyl'skoj AJeS / Arutjunjan R. V., Bol'shov L. A., Borovoj A. A., Velihov E. P., Kljuchnikov A. A. – М. : Nauka, 2010. – 240 s.

5. Novosel'skij O. Ju. Tehnicheskie aspekty avarii na 4-m jenerglobloke Chernobyl'skoj AJeS: Preprint FGUP NIKIJeT ET-05/70 / Novosel'skij O. Ju., Cherkashov Ju. M., Chechero K. P. – М. : Izd-vo “GUP NIKIJeT”, 2005. – 27 s.

6. Dmitriev V. M. Prichiny Chernobyl'skoj avarii izvestny [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu : <http://accident.ru/datas.html>

7. Djatlov A. S. Chernobyl'. Kak jeto bylo [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu : <http://www.rrc2.ru/book/index.html>

8. Karpan N. V. Chernobyl'. Mest' mirnogo atoma [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu : <http://physiciansofchernobyl.org.ua/rus/book/Karpan.html>

9. Suhij A. V. Toplivo kanal'nyh kipjashhijh reaktorov bol'shoj moshhnosti / Suhij A. V., Sagalov S. S., Pavlov S. V. – Dimitrograd : Izd-vo AO “GNC NIIAR”, 2016. – 185 s.

10. Zaspa Ju. P. Kontaktne dinamo jak generator kogerentnih (kooperativnih) kosmichnih form ruhu ta dzherelo planetarnoї, sonjachnoї, galaktichnoї i metagalaktichnoї energii ta elektromagnetizmu. Chastina VIII / Ju. P. Zaspa // Visnik Hmel'nic'kogo nacional'nogo universitetu. Tehnichni nauki. – 2017. – № 5. – С. 226–239.

11. Zaspa Yu. P. Kooperatyvna dinamika, vzaiemoinduktsiia, kompleksna topolohiia ta hiperkompleksna khronolohiia vykhor-khvylovykh form elektromahnitnoho, hravitatsiinoho, synloho i slabkoho, a takozh hidrodinamichnoho poliv proty khybnykh standartiv SM ta LSDM / Yu. P. Zaspa // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2019. – № 1. – С. 254–266.

12. Физическая энциклопедия : в 5 т. / под ред. А. М. Прохорова. – М. : Большая росс jenc., 1999. – 760 с.

13. Свидетел'sтва очевидцев Чернобыль'skoj аварии [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu : <http://accident.ru/evid02.html>

14. Savonenkov V. G. Radiologicheskoe issledovanie toplivosoderzhshih novoobrazovanij, vznikshih v rezul'tate avarii na Chernobyl'skoj AJeS / V. G. Savonenkov, E. B. Anderson, E. A. Smirnova, S. I. Shabayev // Trudy Radievogo instituta im. V.G. Hlopinga. – 2009. – Т. XIV. – С. 87–117.

15. Chechero K. P. Vzryv byl odin, i on byl jadernyj [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu : <http://www.novayagazeta.ru/articles/20011/04/21/5877-vzryv-by-odin-i-on-by-ya-dernyy>

16. Denisov Ju. N. Mehanizm detonacionnogo sgoranija / Ju. N. Denisov, Ja. K. Troshin // PMTF. – 1960. – № 1. – S. 21–35.
17. Pahomov S. A. Ocenka velichiny mgновенного jenergovydelenija pri avarii reaktora na ChAJeS / S. A. Pahomov, Ju. V. Dubasov // Trudy Radievogo instituta im. V. G. Hlopina. – 2009. – T. XIV. – C. 79–86.
18. De Geer L.-E. A Nuclear jet at Chernobyl Around 21:23:45 UTC on April 25, 1986 / L.-E. De Geer, C. Persson, H. Rodhe // Nuclear Technology. – 2018. – V. 201, № 1. – R. 11–22.
19. Bryzgalov V. I. Iz opyta sozdanija i osvoenija Krasnojarskoj i Sajano-Shushenskoj gidrojelektrostantsij / Bryzgalov V. I. – Krasnojarsk : Izd. dom “Surikov”, 1999. – 561 s.
20. Kljukach A. A. Vlijanie asimetrii spiral'noj kamery na vibracii gidroagregata [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu : <http://www.plotina.net/experts/kljukach>
21. Kljukach A. A. O vibracii na agregate № 2 SShGJeS do avarii. Diskussii [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu : <http://tayga.info/details/2011/02/02/~102283>
22. Babachenko Ju. V. Raschetnoe issledovanie radial'nyh sil, dejstvujushhij na rotor radial'no-osevoj gidroturbiny / Ju. V. Babachenko, A. Ju. Avdjushenko // Izvestija Samarskogo nauchnogo centra RAN. – 2013. – T. 15, № 4(2). – S. 547–552.
23. Marchuk A. N. Geologicheskie i geodinamicheskie aspekty v komplekse prichin avarii na Sajano-Shushenskoj GJeS / A. N. Marchuk // Gidrotehnicheskoe stroitel'stvo. – 2012. – № 1. – S. 48–57.
24. Lobanovskij Ju. I. Gidroakusticheskij busting – sposob vzbuzhdenija katastroficheskij avtokolebanij v napornoj sisteme Sajano-Shushenskoj GJeS [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu : <http://synerjetics.ru/article/busting.htm>
25. Akt tehničeskogo rassledovanija prichin avarii, proishedshej 17 avgusta 2009 goda v filiale Otkrytogo Akcionernogo obshhestva “RusGidro” – “Sajano-Shushenskaja GJeS imeni P. S. Neporozhnego”. – M. : Rostehnadzor, 2009. – 50 s.
26. Rassohin G. O razrushenii uzla krepjenija kryshki turbiny gidroagregata № 2 SShGJeS [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu : <http://www.plotina.net/sshges-rassokhin-4/>
27. Bicol. Chastnoe Rassledovanie tehničeskij prichin avarii gidroagregata № 2 Sajano-Shushenskoj GJeS [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu : <http://samlib.ru/b/boris-i-k/sajanges-rassledovanie.shtml/>

Рецензія/Peer review : 27.3.2019 р.

Надрукована/Printed : 11.4.2019 р.

Рецензент: д. т. н., проф. Олександренко В. П.

За зміст повідомлень редакція відповідальності не несе

Повні вимоги до оформлення рукопису **<http://vestnik.ho.com.ua/rules/>**

**Рекомендовано до друку рішенням вченої ради Хмельницького національного університету,
протокол № 9 від 28.03.2019 р.**

Підп. до друку 29.03.2019 р. Ум.друк.арк. 38,22 Обл.-вид.арк. 42,47
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