ISSN 2225-7551

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ,
МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ

В І С Н И К

ЧЕРНІГІВСЬКОГО ДЕРЖАВНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ

СЕРІЯ «ТЕХНІЧНІ НАУКИ»

НАУКОВИЙ ЗБІРНИК

№ 1(55)

Чернігів 2012

УДК 62/69+004
ББК 30/35
В 53

Друкується за рішенням вченої ради університету (протокол № 7 від 26.09.2011 р.). Вісник Чернігівського державного технологічного університету включено до нового переліку наукових фахових видань України, затвердженого постановою Президії ВАК України від 01.07.2010 р. № 1-05/5. Бюлетень ВАК України № 7, 2010.

В53 Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія "Технічні науки": науковий збірник / Черніг. держ. технол. ун-т. – Чернігів: Черніг. держ. технол. ун-т, 2012. – № 1(55). – 257 с.

У цьому випуску "Вісника Чернігівського державного технологічного університету. Серія "Технічні науки" вміщено статті, присвячені теоретичним та експериментальним дослідженням у галузях технічних наук: механохімії, інтегрованих технологій машинобудування та автотранспорту, технологій зварювання, інформаційно-комп'ютерних технологій, енергетики. Статті написані провідними науковцями, аспірантами, магістрантами та студентами і прорецензовані провідними вченими вищих технічних навчальних закладів та закладів НАН України.

"Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія "Технічні науки" буде корисним для науковців різних галузей технічних наук, науково-технічних працівників, аспірантів, магістрантів та студентів вищих технічних навчальних закладів.

Головний редактор:
Казимир В.В., доктор технічних наук, професор, проректор з наукової роботи.
Заступник головного редактора
Пилипенко О.І., доктор технічних наук, професор.
Члени редакційної колегії:
Болотов Г.П., доктор технічних наук, професор;
Волков І.В., доктор технічних наук, професор;
Денисов Ю.О., доктор технічних наук, професор;
Дубенець В.Г., доктор технічних наук, професор;
Дудла І.О., доктор технічних наук, доцент;
Кальченко В.І., доктор технічних наук, професор;
Кальченко В.В., доктор технічних наук, професор;
Литвинов В.В., доктор технічних наук, професор;
Сенько В.І., доктор технічних наук, професор;
Сиза О.І., доктор технічних наук, професор;
Скоробогатова В.І., доктор технічних наук, професор;
Харченко Г.К., доктор технічних наук, професор;
Чередніченко П.І., доктор технічних наук, професор.
Рецензенти:
Бурачек В.Г., доктор технічних наук;
Гутько Ю.І., доктор технічних наук;
Жуйков В.Я., доктор технічних наук;
Загороднюк А.В., доктор математичних наук;
Квасніков В.П., доктор технічних наук;
Кирєєв Л.С., доктор технічних наук;
Клименко С.А., доктор технічних наук;
Корченко О.Г., доктор технічних наук;
Михайлов О.М., доктор технічних наук;
Павленко П.М., доктор технічних наук;
Петко І.В., доктор технічних наук;
Положаєнко С.А., доктор технічних наук;
Семак Б.Д., доктор технічних наук;
Субач І.Ю., доктор технічних наук;
Томашевський В.М., доктор технічних наук;
Ямненко Ю.С., доктор технічних наук.

Заснований у 1996 році. Свідоцтво про державну реєстрацію
КВ № 14994-3966 ПР від 27.02.2009 р.

© Колектив авторів, 2012
© Чернігівський державний технологічний університет, 2012

ISSN2225-7551

ЗМІСТ

ДО 20-РІЧЧЯ ЧЕРНІГІВСЬКОГО ВІДДІЛЕННЯ ІНЖЕНЕРНОЇ АКАДЕМІЇ УКРАЇНИ

1 **Іванова І.М.**
ПОДВІЙНИЙ ЮВІЛЕЙ 5

2 **Кривошеєв В.Т., Кукуруза В.Д., Іванова Є.З., Іванова І.М., Макогон В.В.**
ПРОБЛЕМИ ЕФЕКТИВНИХ ПОШУКІВ РОДОВИЩ НАФТИ І ГАЗУ В УКРАЇНІ ТА НАПРЯМКИ ЇХ ВИРІШЕННЯ 7

3 **Кукуруза В.Д., Кривошеєв В.Т., Іванова Є.З.**
СУЧАСНЕ НАУКОВЕ ПОЯСНЕННЯ ТА ІНЖЕНЕРНІ МОЖЛИВОСТІ ПОПЕРЕДЖЕННЯ “ЗАГАДКОВИХ” КОРАБЕЛЬНИХ І АВІАЦІЙНИХ КАТАСТРОФ 19

РОЗДІЛ І. МЕХАНОХІМІЯ

4 **Кузяев И.М., Митрохин А.А.**
ОПТИМИЗАЦИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАНОТРУБОК И ВОЛОКОН 25

5 **Акимов О.О., Коваленко Г.М., Коваленко К.Г.**
ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ФОРМУВАННЯ ПОГОНАЖНИХ ВИРОБІВ З ЖОРСТКОГО ПВХ НА ЕКСТРУЗІЙНІЙ ЛІНІЇ ЛП-45 35

6 **Савченко О.В.**
ОПТИМАЛЬНЕ ПРОЕКТУВАННЯ ОБОЛОНОК ДЛЯ РОБОТИ У ЗАДАНОМУ ЧАСТОТНОМУ ДІАПАЗОНІ 39

7 **Дубенець В.Г., Горбатко О.О., Деркач О.Л.**
ЧИСЕЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАНОКОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ 46

8 **Буря І.О., Кузнецова О.Ю., Тихонов І.В., Колбасін О.О., Пеліна Т.О.**
ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМОСТІЙКОСТІ КОМПОЗИТІВ НА ОСНОВІ ФЕНІЛОНУ ТА ГІБРИДНОГО НАПОВНЮВАЧА 59

9 **Сизая О.И., Челябиева В.Н., Квашук Ю.В.**
ВЛИЯНИЕ ПРОИЗВОДНЫХ 3,4-ДИХЛОР-(2Н)-ПИРИДАЗИН-3-ОНА НА КОРРОЗИОННУЮ СТОЙКОСТЬ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ 68

10 **Ігнатенко П.Л.**
ОСНОВНІ СПОСОБИ ВИЗНАЧЕННЯ ВОЛОГОСТІ У ДЕРЕВИНІ 73

11 **Денисенко Т.М., Хребтань О.Б.**
ТОВАРОЗНАВЧА ОЦІНКА ЯКОСТІ ТОМАТНИХ СОУСІВ, ЯКІ РЕАЛІЗУЮТЬСЯ В РОЗДРІБНІЙ ТОРГІВЕЛЬНІЙ МЕРЕЖІ М. ЧЕРНІГОВА 77

РОЗДІЛ ІІ. ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ МАШИНОБУДУВАННЯ І АВТОТРАНСПОРТУ

12 **Федориненко Д.Ю.**
СТАТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕГУЛЬОВАНИХ ГІДРОСТАТИЧНИХ ОПОР З НЕІДЕАЛЬНОЮ ГЕОМЕТРІЄЮ СПРЯЖЕНИХ ПОВЕРХОНЬ 82

13 **Чуприна В.М.**
ОПТИМІЗАЦІЯ ДИНАМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ КОМПЛЕКТНИХ ШПИНДЕЛЬНИХ ВУЗЛІВ В CAD-CAE СИСТЕМІ SOLIDWORKS/COSMOSWORKS 88

14 **Рудик А.В., Рудик В.А.**
ВИЗНАЧЕННЯ ГРАНИЧНОЇ ТОВЩИНИ ЗРІЗУ, ЩО ЗАБЕЗПЕЧУЄ ЕФЕКТИВНЕ ШЛІФУВАННЯ 96

15 **Будьонний О.В., Прокопець М.А., Коваленко Є.Ю.**
БЕЗКОНТАКТНА ЗАРЯДКА АКУМУЛЯТОРНИХ БАТАРЕЙ 102

16 **Міщенко О.М., Міщенко М.В.**
ВИКОРИСТАННЯ ГІБРИДНИХ СИЛОВИХ УСТАНОВОК НА МІСЬКОМУ ТРАНСПОРТІ ЗАГАЛЬНОГО КОРИСТУВАННЯ 107

17 **Максименко В.А., Барбаш М.И.**
СИСТЕМНОЕ ОЦЕНИВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ 110

18 **Кальченко В.В., Юрченко Ю.Д.**
ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ РІЗАННЯ ПРИ ТОЧІННІ РІЗЦЯМИ З ВНУТРІШНІМ ТЕПЛОВІДВЕДЕННЯМ 114

РОЗДІЛ ІІІ. ТЕХНОЛОГІЇ ЗВАРЮВАННЯ

19 **Болотов М.Г., Ганєєв Т.Р.**
ЕФЕКТИВНІСТЬ НАГРІВУ ПРИ ЗВАРЮВАННІ В ТЛІЮЧОМУ РОЗРЯДІ З ПОРОЖНИСТИМ КАТОДОМ 126

20 Харченко Г.К., Фальченко Ю.В., Петрушинець Л.В.
ДИФУЗІЙНЕ ЗВАРЮВАННЯ У ВАКУУМІ ІНТЕРМЕТАЛІДНОГО СПЛАВУ γ-TIAL ІЗ СПЛАВОМ ТИТАНУ ВТ8 131

21 Вайц Д.В., Співак В.М., Коваленко Є.Ю.
КЕРУВАННЯ ДОЗОВАНОЇ ПОДАЧІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ПІД ЧАС ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ МЕТАЛІВ 135

РОЗДІЛ IV. ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ

22 Казимир В.В., Харченко М.В.
МОДЕЛЬНО-ОРІЄНТОВАНА ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА ПІДТРИМКИ УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ ВНЗ 140

23 Бичко В.А., Абламський Д.О., Dr. Ramit Azad
ПЕРЕТВОРЕННЯ ЗАДАЧІ РОЗПІЗНАВАННЯ АКУСТИЧНИХ СИГНАЛІВ У ЗАДАЧУ РОЗПІЗНАВАННЯ ЗОРОВИХ ОБРАЗІВ 147

24 Нікітенко Є.В., Заровський Р.В., Микитко С.В.
РОЗПОДІЛЕНА СИСТЕМА ОБРОБКИ ТА ВИВОДУ ВІДЕОДАНИХ 155

25 Лопаткин Р.Ю., Иващенко В.А.
ЯЗЫК ПРОГРАММИРОВАНИЯ GROOVY КАК СРЕДСТВО ОПИСАНИЯ МУЛЬТИАГЕНТНЫХ МОДЕЛЕЙ 160

26 Войтенко В.П., Королев А.А, Комзол П.К.
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С ЦИФРОВЫМ КВАЗИОПТИМАЛЬНЫМ РЕГУЛЯТОРОМ В ПОТЕНЦИОСТАТЕ 166

27 Зайцев С.В.
АНАЛІЗ ПРОПУСКНОЇ СПРОМОЖНОСТІ КАНАЛУ ЗВ'ЯЗКУ З НАВМИСНИМИ ЗАВАДАМИ ТА СИГНАЛАМИ OFDM 172

28 Сатюков А.І., Журко В.П., Тепла Т.М., Бивалькевич М.О.
ВИКОРИСТАННЯ ВУЗЬКОЗОННИХ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ АНТИМОНІДУ ВІСМУТУ ДЛЯ ІНДИКАЦІЇ НВЧ 183

29 Зацерковний В. І.
АНАЛІЗ СТАНУ ТОПОГРАФІЧНО-КАРТОГРАФІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯК ДЖЕРЕЛА ДАНИХ ДЛЯ ГІС ЧЕРНІГІВСЬКОЇ ОБЛАСТІ 186

РОЗДІЛ V. ЕНЕРГЕТИКА

30 Тітова Н.В.
МОДЕЛЮВАННЯ ВІТРОАГРЕГАТА В MATLAB/SIMULINK 194

31 Колесник С.П.
ПУТИ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ В СЕТЯХ 6-35 кВ НА ИННОВАЦИОННЫХ ИЗДЕЛИЯХ «РЕЛСИС» 198

32 Мірошник О.О.
МЕТОД РОЗРАХУНКУ СИМЕТРИЧНИХ СКЛАДОВИХ НАПРУГ МЕРЕЖІ 0,38/0,22 кВ 206

33 Сулейманов В.М., Баженов В.А., Кацадзе Т.Л.
ОПТИМІЗАЦІЯ РОБОЧИХ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ СИСТЕМОУТВОРЮВАЛЬНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧ НАДВИСОКОЇ НОМІНАЛЬНОЇ НАПРУГИ 211

34 Назаров В.В., Масловський С.Б.
ЕНЕРГОЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ РОЗПОДІЛЬНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ 218

35 Семененко С. Н.
ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ, БЕЗОПАСНОСТИ И УДОБСТВА ОБСЛУЖИВАНИЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ 6(10) кВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРВТ-10 кВ 221

36 Буйный Р.А., Дихтярук И.В., Красножон А.В.
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАЗЪЕДИНИТЕЛЯ РЛКВ-С-10 ДЛЯ СЕКЦИОНИРОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ НАПРЯЖЕНИЕМ 10 кВ 227

37 Пентегов І.В., Приступа А.Л.
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА УСТАНОВКА ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕСЛІВСЬКИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ БЕЗКОНТАКТНІЙ ЗАРЯДЦІ АКУМУЛЯТОРІВ 233

38 Денисов Ю.О., Городній О.М., Купко О.А.
ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ ТА СТАТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ КРІП-ПНС ПАРАЛЕЛЬНОГО ТИПУ 239

39 Квицинський А.О., Майстренко І.О.
ПРОГНОЗУВАННЯ МАСШТАБІВ ЗАРАЖЕННЯ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ НАСЕЛЕНИХ МІСЦЬ ЕЛЕГАЗОМ І ПРОДУКТАМИ ЙОГО РОЗКЛАДАННЯ 245

ОСНОВНІ ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ ТА ПОДАЧІ РУКОПИСІВ НАУКОВИХ СТАТЕЙ ДО "ВІСНИКА ЧЕРНІГІВСЬКОГО ДЕРЖАВНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ" СЕРІЯ "ТЕХНІЧНІ НАУКИ" 249

ДО 20-РІЧЧЯ ЧЕРНІГІВСЬКОГО ВІДДІЛЕННЯ ІНЖЕНЕРНОЇ АКАДЕМІЇ УКРАЇНИ

І.М. Іванова, академік Інженерної академії України, д-р техн. наук

ПОДВІЙНИЙ ЮВІЛЕЙ

У 1991 році було створено Інженерну академію України (ІАУ), де органічно поєднались потенціал науковців з інтелектом інженерів-практиків для розв'язання проблем, які мають життєво важливе значення для розвитку економіки незалежної України. Першим президентом ІАУ був заслужений діяч науки і техніки України, лауреат Державної премії України, засновник Інституту проблем машинобудування Національної академії наук України, засновник наукової школи водородної енергетики Анатолій Миколайович Підгорний. Він багато років працював у системі Національної академії наук України, але відчував певну незадоволеність тим, що досягнення фундаментальної науки тривалий час не знаходять практичного використання, тому і створив ІАУ.

Інженерна академія України створювалась не як конкуруюча частина Національної академії наук України, а як громадська організація, що забезпечує додаткові можливості ефективного використання досягнень академічної і галузевої науки в промисловості. Минулі 20 років підтвердили правильність поглядів А. М. Підгорного на роль і місце Інженерної академії України в ієрархії інтелектуальної еліти науково-технічних організацій України.

Постанова про створення Чернігівського відділення Інженерної академії України (ЧВІАУ) була підписана 4 березня 1992 р. президентом Інженерної академії України А. М. Підгорним, а 15 червня 1992 р. Чернігівське відділення Інженерної академії України було зареєстровано виконавчим комітетом міської ради народних депутатів м. Чернігова. В якості колективного члена до складу Інженерної академії України ввійшло НВО «Хімтекстильмаш», яке і надало ЧВІАУ приміщення для роботи.

Організаторами ЧВІАУ були д-р техн. наук, професор Чернігівського державного технологічного університету Д. І. Котєльніков і генеральний директор НВО «Хімтекстильмаш», д-р техн. наук, професор В. І. Ступа, який багато років успішно керував роботою в якості Голови Чернігівського відділення Інженерної академії України.

Чернігівське відділення Інженерної академії України розпочало свою діяльність у складний для держави час. Роботи з надання науково-технічної допомоги виробництвам з впровадження науково-технічних досягнень ускладнювались економічними проблемами, але все ж наполегливо здійснювались відповідно до спеціалізації членів відділення.

Вперше в Україні опановано основне технологічне обладнання для переробки олійних рослин (сонях, соя, рапс, гірчиця) під керівництвом академіків Інженерної академії України Ступи В. І., Ільїна В. Г. та члена-кореспондента ІАУ Тенн О. І. Розробкою фільтрів займався академічний радник Інженерної академії України Майборода М. М.; нетканими матеріалами – член-кореспондент Інженерної академії України, д-р екон. наук Ільчук В. П.; обладнанням для згущеного молока, гречаної крупи – академік Платонов Є. К.; обладнанням для хімволокон, дезактивацією радіоактивних відходів – академік Інженерної академії України, д-р техн. наук Ільїн В. Г. та академічний радник Антоненко В. І.; устаткуванням для миття автотранспорту – член-кореспондент Інженерної академії України Підтілок Л. М.; обладнанням для кондитерських виробів – академічний радник Ти-

щенко В. Г. Ряд важливих робіт було виконано щодо пошуку нафти і газу в південних регіонах України академіками ІАУ Кривошеєвим В. Т., Кукурузою В. Д., Савченко В. І., академічним радником ІАУ Івановою Є. З.

Важливу роль відігравали керівники найбільших підприємств Чернігова – КСК «Чексіл» та ПО «Хімволокно» – академік Інженерної академії України Попов В. П. і член-кореспондент ІАУ Лисенко А. О., які сприяли науковим розробкам та їх випробуванням у виробничих умовах.

Значну організаційну роботу здійснювали академіки Інженерної академії України Товстиженко П. П., Бутко М. П., Вакуленко В. М., члени-кореспонденти Інженерної академії України Менайлов О. М., Белітченко В. І., Іванов В. Б., потім приєднались і академічні радники Іванишин В. А., Пащенко Г. М.

Приємно підкреслити, що сприяли позитивному іміджу Чернігівського відділення Інженерної академії України і керівники місцевих державних органів влади, зокрема Косих В. А., Білоусов О. О., Саранін О. Л.

За клопотанням Чернігівського відділення Інженерної академії України академіку Інженерної академії України Савченко В. І. у 1997 році Указом Президента України Кучми Л. Д. присвоєно Почесне звання «Заслужений діяч науки і техніки України».

Виконані роботи дозволили Чернігівському відділенню Інженерної академії України отримати досвід, організувати додаткові робочі місця, зберегти спеціалістів і здійснювати власним коштом пошукові роботи, що привело, зокрема, до солідного 2-х річного контракту академіка Інженерної академії України Ступи В. І. з італійською фірмою.

Діяльність Чернігівського відділення Інженерної академії України не обмежувалась господарською діяльністю, в активі – участь у міжнародних конгресах Міжнародної інженерної академії в Канаді, Франції, Швейцарії (Кривошеєв В. Т., Кукуруза В.Д., Іванова Є.З.); фінансова допомога Чернігівській державній обласній універсальній науковій бібліотеці ім. В.Г. Короленка на придбання наукової літератури; участь в організації предметної олімпіади серед старшокласників м. Чернігова; проведення конкурсу дипломних робіт у Чернігівському державному технологічному університеті (академічні радники, канд. техн. наук Акімов О. О., Сапон С. П.); конкурсу до 15-річчя Інженерної академії України в Чернігівському державного інституті економіки і управління (академік Інженерної академії України Товстиженко П. М., член-кореспондент Менайлов О. М.); розповсюдження щорічного журналу «Вісник Інженерної академії України» та інше.

Свій 20-річний ювілей Чернігівське відділення Інженерної академії України зустрічає в оновленому складі, до якого ввійшли досвідчені фахівці – проректор з наукової роботи Чернігівського державного технологічного університету, д-р техн. наук Казимир В. В. (нині – голова Чернігівського відділення Інженерної академії України), ректор Чернігівського державного технологічного університету, д-р екон. наук Шкарлет С. М., є і молоді перспективні кандидати.

Нехай цей ювілейний рік запам’ятається добрими справами і цікавими планами на майбутнє!

В. Т. Кривошеєв, академік Інженерної академії України
Чернігівське відділення УкрДГРІ, м. Чернігів, Україна

В. Д. Кукуруза, академік Інженерної академії України
Науково-впроваджувальна фірма "НДРнафтогаз"

Є. З. Іванова, академічний радник Інженерної академії України
Чернігівське відділення УкрДГРІ, м. Чернігів, Україна

І. М. Іванова, академік Інженерної академії України
Чернігівський державний інститут економіки і управління, м. Чернігів, Україна

В. В. Макогон
Чернігівське відділення УкрДГРІ, м. Чернігів, Україна

ПРОБЛЕМИ ЕФЕКТИВНИХ ПОШУКІВ РОДОВИЩ НАФТИ І ГАЗУ В УКРАЇНІ ТА НАПРЯМКИ ЇХ ВИРІШЕННЯ

Економічні негаразди в Україні за часів незалежності привели до різкого скорочення геологорозвідувальних робіт на нафту і газ, падіння видобутку вуглеводневої сировини, зниження приростів запасів та різкого згортання науково-дослідних робіт по забезпеченню приростів запасів вуглеводнів, незважаючи на те, що потенціальні ресурси нафти і газу в Україні в пастках різного типу ще досить значні, а нафтогазова галузь є основою паливно-енергетичної, економічної та політичної незалежності держави.

Високоприбутковій у минулому геологорозвідувальний комплекс у державі практично зруйновано, що привело до значного зменшення відкриттів нових родовищ нафти і газу та приростів запасів вуглеводневої сировини. Спостерігається стійке падіння видобутку нафти і газу, що в свою чергу викличе нові труднощі в паливно-енергетичному комплексі та зв'язаними з ним галузями народного господарства.

У ці скрутні часи ми неодноразово орієнтували нафтогазову галузь та владні структури держави на використання власних резервів, власних можливостей для прискореного відкриття нових родовищ нафти і газу, оскільки деякі вітчизняні розробки прогнозного спрямування значно дешевші від зарубіжних та характеризуються високою ефективністю.

Першочерговим завданням нафтогазової галузі в умовах, які склалися, є вирішення проблеми значного підвищення ефективності геологорозвідувальних робіт. Незважаючи на те, що в основних нафтогазовидобувних районах сходу, заходу та півдня країни фонд традиційних об'єктів, представлених добре вираженими антиклінальними структурами, значно вичерпаний, ще велика частина прогнозних ресурсів зв'язана з різноманітними нетрадиційними стратиграфічно-, літологічно-, тектонічно екранованими і комбінованими пастками, з карбонатними рифогенними масивами, похованими і розформованими підняттями, з розущільненими кристалічними породами фундаменту і т.п. Прогноз нетрадиційних типів пасток та пошуки в них скупчень вуглеводнів (ВВ) потребує детальних досліджень. Вибір першочергових об'єктів для буріння пошукових свердловин у цих умовах досить складний, якщо враховувати, що за статистикою тільки одна третина пробурених свердловин продуктивна, а дві третини порожні. У зв'язку з цим тут важливу роль відіграє якість комплексного геологічного та геофізичного прогнозу. Роботи цього напрямку широко проводяться у Чернігівському відділенні Українського державного геологорозвідувального інституту.

Власні резерви для підвищення ефективності геологорозвідувальних робіт на нафту і газ в Україні у цілому та в основному її нафтогазовидобувному регіоні – Дніпровсько-Донецькому басейні – дозволять значно скоротити строки проведення пошукових робіт, прискорено відкрити нові родовища, збільшити приріст запасів на перспективу та поточний видобуток нафти і газу.

На активізацію цих резервів направлені розробки авторів цієї доповіді.

У довгому ланцюзі пошуки-розвідка-експлуатація родовищ нафти і газу пріоритетне значення мають роботи галузевої геологорозвідувальної науки, яка висвітлює питання щодо регіонального вивчення надр у широкому розумінні цих досліджень для потреб розвитку мінерально-сировинної бази країни і контролю за використанням надр, планування геологорозвідувальних робіт та приросту запасів вуглеводнів у державі та здійснення наукового супроводу геологорозвідувальних робіт.

Одним із пріоритетних завдань для вирішення проблем ефективних пошуків нафти і газу є обґрунтування напрямів геологорозвідувальних робіт як на ближню, так і на дальню перспективу. Ця робота базуються на комплексних детальних дослідженнях геологічної будови, літології, фацій, стратиграфії та ін.

Найбільшу увагу дослідників привертала Дніпровсько-Донецька нафтогазоносна субпровінція – основний нафтогазовидобувний регіон України, з яким фахівці зв'язують ще значні прирости запасів нафти і газу в найближчому майбутньому.

Регіон відноситься до добре вивченого в нафтогазоносному відношенні сейсморозвідкою, глибоким бурінням по традиційних (антиклінальних) пастках, особливо в прибортових її частинах, де відкрита більшість з 230 родовищ нафти, газу і газоконденсату. Абсолютна більшість добре виражених антиклінальних структур як у занурених частинах западини, так і в межах північної і південної прибортових зон і бортів виявлено та опошуковано. Фонд неопошукованних антиклінальних структур тепер представлений в основному дрібними і слабовираженими об`єктами, які не зможуть підтримувати в перспективі сучасні рівні видобутку нафти та газу і тим більше їх значне збільшення в регіоні.

Як показує досвід проведення геологорозвідувальних робіт у схожих за геологічною будовою з Дніпровсько-Донецькою западиною (ДДЗ) нафтогазоносних басейнах, серед відкритих родовищ починають переважати скупчення нафти і газу в нетрадиційних (літолого-стратиграфічних, літологічних, тектонічних, комбінованих) пастках як у теригенних, так і в карбонатних відкладах. Відомо, що прогноз пасток цього типу досить складний, часто ми маємо справу з малими потужностями відкладів, при яких сейсмічні дослідження малоінформативні. Тільки детальні погоризонтні комплексні геолого-геофізичні дослідження дають можливість об'єктивного прогнозу цих пасток.

Ми надавали роботам цього напрямку важливе значення, вважаючи, що проблема синхронізації продуктивних комплексів, товщ, продуктивних горизонтів (ПГ) і окремих пластів нафтогазоносних басейнів є однією з найбільш актуальних проблем геології нафти і газу як у теоретичному, так і в практичному відношенні при прогнозі пасток вуглеводнів (ВВ), особливо, нетрадиційного типу. В добре вивченому бурінням і сейсморозвідкою Дніпровсько-Донецькому нафтогазоносному басейні вона стоїть досить гостро, оскільки тут існує низка науково необґрунтованих схем стратиграфії (у тому числі прийнята стратиграфічним комітетом "Стратиграфічна схема кам'яновугільних відкладів східних областей України" 1993 року), які стримують детальне картування відкладів та об'єктивний прогноз нових типів пасток нафти і газу.

Нашими дослідженнями розроблена схема розчленування та кореляції нижнього карбону западини, що базується на детальному літолого-стратиграфічному та біостратиграфічному вивченні, розчленуванні відкладів, послідовній (від свердловини до свердловини, від добре вивчених розрізів до менш вивчених, від повних у стратиграфічному відношенні до скорочених) кореляції "каркасу" відкладів – морських витриманих пачок аргілітів, які часто вміщують маркуючі вапняки, та більш мінливих піщаних, піщано-алевритових продуктивних горизонтів. Сформована на цих принципах модель будови візейського та турнейського ярусів і літолого-стратиграфічні схеми розчленування їх розрізів різних геотектонічних зон западини враховує усі, у тому числі і найновіші біо-

і літолого-стратиграфічні дослідження, регіональні, зональні та локальні перериви в осадконакопиченні. Виділені характерні одновікові літологічні пачки порід та надійні регіональні та зональні репери дозволили надійно корелювати відклади, виявити та протрасувати перериви в осадконакопиченні. На основі цих досліджень для широкого впровадження рекомендована нова схема стратиграфії турнейського та візейського ярусів, яка відіграла принципове значення при регіональному вивченні всієї території западини та прогнозі нових типів пасток нафти і газу в регіоні [1-7].

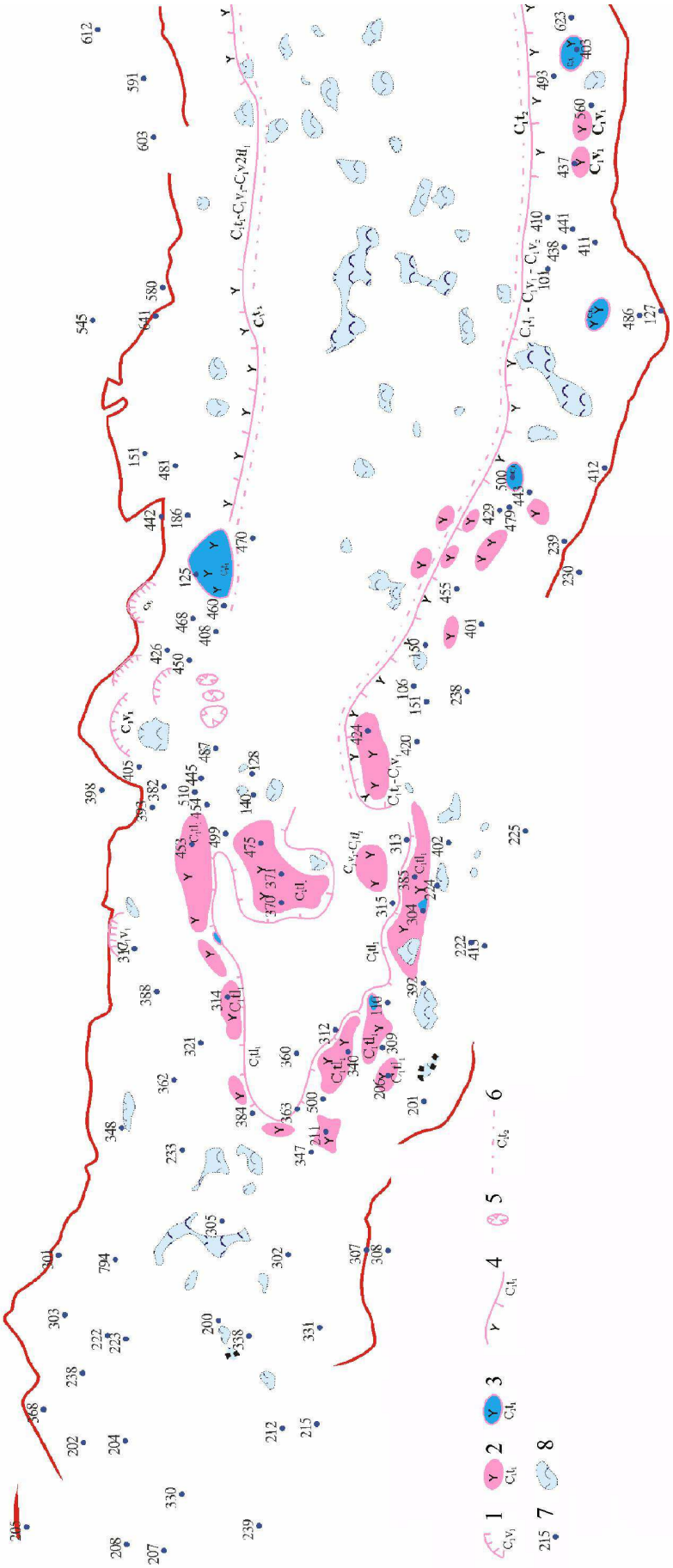
Працюючи протягом більше 35 років у регіоні, володіючи практично усім літологічним та біостратиграфічним матеріалом по ДДЗ, автори постійно опікуються вищеназваними проблемами. В останні роки нами складено "Каталог продуктивних горизонтів нижнього карбону ДДЗ на основі єдиної літолого-стратиграфічної кореляції та індексації – бази сучасних геологічних досліджень". Він охоплює практично усі принципові (більше 3,5 тисяч) глибокі свердловини регіону і дав змогу вперше для всієї западини виконати різноманітні об'єктивні геологічні побудови, геологічне моделювання та картування. На основі комплексних досліджень відкладів та з використанням цієї величезної комп'ютерної бази даних нами вперше для всієї території ДДЗ за допомогою геоінформативних технологій складено 15 погоризонтних літолого-палеогеографічних карт нового покоління масштабу 1:200 000, які характеризують мікрофауністичні (МФГ) та продуктивні горизонти (ПГ) турнейського та візейського ярусів. Ці карти є сучасною фундаментальною основою для визначення нових, науково обґрунтованих напрямків геологорозвідувальних робіт, прогнозу нових, перш за все, нетрадиційних типів пасток ВВ, які будуть сприяти новому розвитку старого основного нафтогазовидобувного басейну України та відкриттю значних за запасами родовищ нафти і газу.

Разом з пошуками скупчень нафти і газу в традиційних антиклінальних пастках у ДДЗ виявлено декілька родовищ, зв'язаних з нетрадиційними неструктурними пастками. Типовими є Мучуське газоконденсатне родовище в рифогенно-карбонатному руденківсько-ранньотурнейському масиві та Волошківське газоконденсатне родовище в літолого-стратиграфічній пастці надрозмивних верхньовізейських пісковиків на моноклінальному схилі Срібненської депресії. Відкриття родовищ у цих нетрадиційних типах пасток реально свідчило про необхідність проведення цілеспрямованих науково-дослідних робіт по їх прогнозу.

Нашими багаторічними комплексними дослідженнями було обґрунтовано цей напрямок робіт та виконано прогноз зон і ділянок розвитку нових типів пасток нафти і газу на усій території ДДЗ.

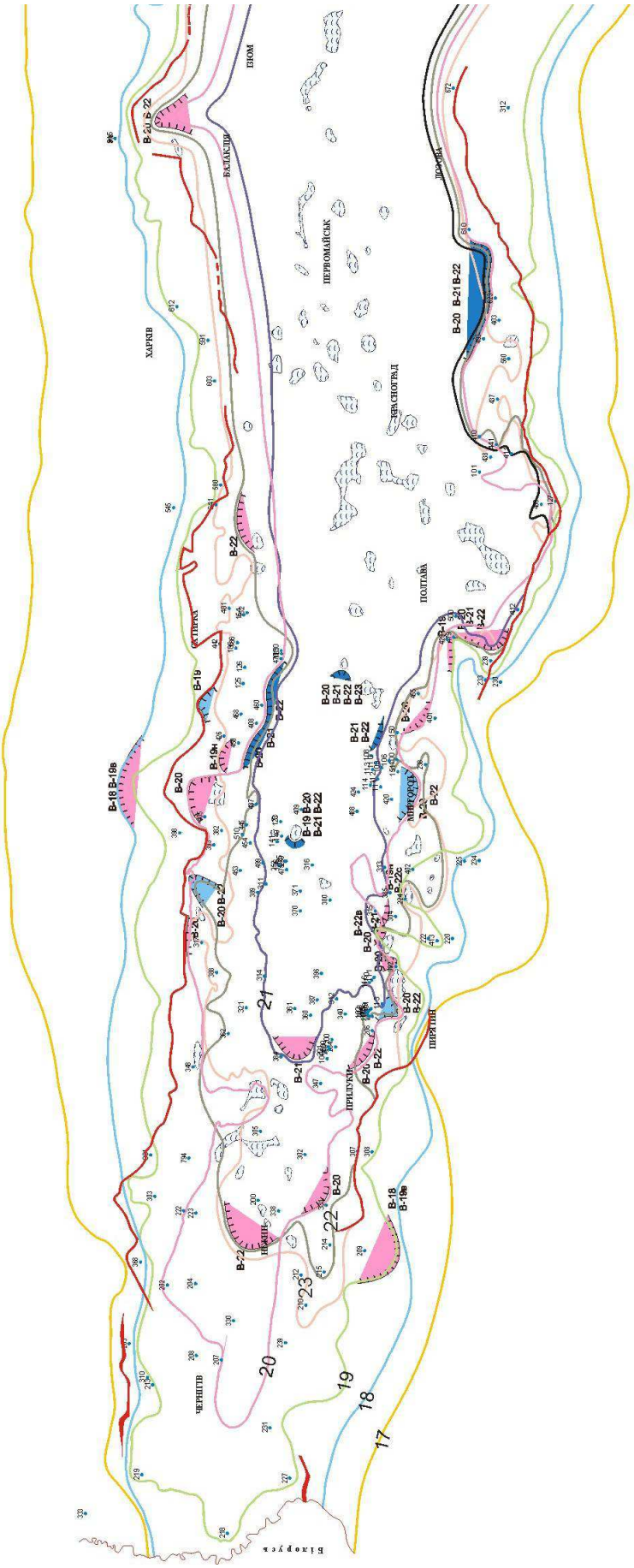
У карбонатних відкладах терне, нижнього візе та нижньої тули нами виділена численна група прогнозних пасток, які зв'язані з внутрішньошельфовими рифогенно-карбонатними масивами та прогнозні зони розвитку бар'єрних рифів у зонах переходу шельфу в депресію. Крім цих типів пасток, з покрівлею карбонатів зв'язані пастки розвитку палеокарсту (рис.1).

У теригенних турнейських та візейських відкладах ми прогнозуємо широкий розвиток літолого-стратиграфічних та літологічних пасток у зонах переходу моноклінальних схилів Дніпровсько-Донецької западини у великі депресії та на схилах занурених структур, у малих депресіях прибортових зон, пастки виклинювання (літологічного заміщення) алексинських і тульських (XII та XIIа МФГ) горизонтів на моноклінялях прибортових зон та на бортах западини, прогнозні літолого-стратиграфічні зони та пастки верхньотурнейських теригенних відкладів на схилах рифогенно-карбонатних масивів, прогнозні пастки розвитку акумулятивних піщаних тіл і зв'язаних з ними внутрічохольних структур (рис. 2). Ці питання широко висвітлювались у численних наукових роботах та на Міжнародних науково-практичних конференціях [1-7].



1 – літолого-стратиграфічні і літологічні пастки в зонах переходу моноклінальних схилів у великі депресії та на схилах занурених структур; 2 – пастки виклинювання (літологічного заміщення) алексинських і тульських (XII і XIIа МФГ) продуктивних горизонтів на моноклінальних прибортових зон та бортах западини; 3 – літолого-стратиграфічні пастки малих дипресій у прибортових зонах; 4 – продуктивні горизонти, в яких прогнозуються пастки ВВ; 5 – лінії виклинювання продуктивних горизонтів; 6 – пробурені параметричні свердловини; 7 – солянні штоки.

Рис. 1. Карта прогнозних зон і ділянок у відкладах XIIа та XII МФГ ДДЗ.
Складено: Кривошеєвим В.Т., Макогоном В.В., Івановою Є.З.
Комп'ютерна версія: Матюша Є.В.



1 – прогнозні літолого-стратиграфічні пастки в нижньовізейських відкладах; 2 – прогнозні пастки, які зв'язані з внутрішньошельфовими рифогенно-карбонатними масивами; 3 – встановлені пастки, які зв'язані з внутрішньошельфовими рифогенно-карбонатними масивами; 4 – прогнозні зони розвитку бар'єрних рифів у смугах переходу шельфу в депресію; 5 – прогнозні літолого-стратиграфічні зони та пастки верхньотурнейських теригенних відкладів на схилах рифогенно-карбонатних масивів; 6 – прогнозні пастки розвитку акумулятивних піщаних тіл і зв'язаних з ними внутрішньочохольних структур; 7 – пробурені параметричні свердловини; 8 — соляні штоки.

Рис. 2. Карта прогнозних зон і об'єктів у нижньотурнейських, верхньотурнейських, нижньовізейських та нижньотульських відкладах ДДЗ.
Складено: Кривошеєвим В.Т., Макогоном В.В., Івановою Є.З.
Комп'ютерна версія: Матюша Є.В.

З нетрадиційними пастками можуть бути зв'язані крупні скупчення нафти і газу, які практично вичерпані в традиційних антиклінальних пастках.

Таким чином, встановлена нашими науково-дослідними роботами велика група прогнозних неструктурних пасток являє собою великий резерв для проведення геологорозвідувальних робіт, відкриття нових родовищ та другого дихання старого нафтогазоносного регіону України – Дніпровсько-Донецького басейну. Однак одна справа виконати геологічний прогноз нових пошукових об'єктів і зовсім інша справа дати об'єктивну оцінку нафтогазоносності кожного із них до буріння дорогих свердловин та ефективно провести пошукове буріння.

Пошукове буріння на нафту і газ в Україні традиційно проводиться на основі загального уявлення про нафтогазоносність регіону у цілому та даних сейсморозвідувальних робіт по виявленню перспективних структур. Такий підхід до пошуків нових родовищ нафти і газу з метою їх найшвидшого відкриття сьогодні себе явно не виправдовує, оскільки не усі структури нафтогазонасичені, а серед традиційних методів немає надійного методу оцінки нафтогазоносності об'єктів. Ефективність пошукових робіт на нафту і газ на нових структурах в України складає біля 30 %.

Основним методом підготовки площ для пошукового буріння на нафту і газ залишається сейсморозвідка. Базуючись на структурному факторі, вона не відповідає на питання нафтогазоносності тієї чи іншої структури. Тому в останнє десятиліття ДП "Укргазвидобування" НАК "Нафтогаз України" на пошукових площах проведено комплекс досліджень, який включав різні прямі методи пошуків вуглеводнів (ВВ). Аналіз цих робіт, виконаний ДП "Науканафтогаз", показав, що ефективність пошукового буріння досягає лише 34 %, непродуктивними виявились 66 % структур. Таким чином, було доказано, що далеко не усі дешеві прямі методи є ефективними, бо пробуреними на їх прогнозі пошуковими свердловинами було марно витрачено сотні мільйонів гривень.

Спираючись на багаторічний досвід проведення прогнозних робіт різними методами, вважаємо, що необхідний комплекс оцінки нафтогазоносності окремих об'єктів до буріння пошукових свердловин повинен обов'язково включати найбільш інформативні за рейтингом – детальну сучасну сейсморозвідку, метод ЕПНГ та геохімічні дослідження.

Ми впевнені, що першочерговим завданням нафтогазової галузі повинно бути прискорене вирішення проблеми значного підвищення ефективності геологорозвідувальних робіт на основі комплексування сучасних вітчизняних традиційних та нетрадиційних методів пошуків і розвідки родовищ нафти та газу, яке широко випробувано в Україні. У зв'язку з цим ще раз звертаємо увагу фахівців на результати застосування та необхідність широкого впровадження високоефективного пошукового методу електрофізичного прогнозу нафтогазоносності (ЕПНГ) до буріння свердловин.

Нетрадиційний метод ЕПНГ розроблено у Чернігівському відділенні УкрДГРІ доктором геолого-мінералогічних наук Кукурузою В.Д., а у подальшому запатентовано та удосконалено за допомогою комп'ютерних технологій проведення як польових досліджень, так і камеральної обробки отриманої бази даних [11;12]. Він є практично прямим методом, який до буріння свердловин оперативно вирішує принципові задачі нафтогазоносності. Метод ЕПНГ заснований на виявленні наявного закономірного взаємозв`язку між нафтогазовим покладом і характером прояву електрофізичних процесів у його межах (за магнітними параметрами) і над ним в області дифузійно-фільтраційного потоку вуглеводнів (за електричними даними), викликаних зміною фізико-хімічних властивостей рідин і нафтогазонасичених порід.

На часових вертикальних розрізах інформативних параметрів нормованих полів виявляються як поклад, так і дифузійно-фільтраційний потік вуглеводнів, що підіймається над ним, чого не спостерігається над "порожніми" структурами.

Перевагою методу є те, що з аналізу матеріалів ми виключаємо дані зони активного водообміну (до глибини 500 м і більше), де можуть бути отримані складні, спотворені результати вертикального дифузійно-фільтраційного потоку ВВ над родовищами. Метод дозволяє прогнозувати скупчення нафти і газу як в антиклінальних та неантиклінальних пастках осадочного чохла, так і в тріщинуватих зонах кристалічного фундаменту.

Особливо слід відзначити, що роботи методом електрофізичного прогнозу нафтогазоносності в Україні розпочаті набагато раніше, ніж подібні роботи за кордоном. Незважаючи на це, цей напрямок прогнозу набув там широкого розвитку. Один із аналогів цього методу – метод Electraflex – широко використовується канадськими фірмами для розбраковки пошукових об'єктів по нафтогазоносності до буріння пошукових свердловин. Він включений до обов'язкового комплексу при проведенні пошукових робіт на нафту і газ, без нього пошукові свердловини не буряться. Ефективність методу сягає 86 % при прогнозі промислових скупчень вуглеводнів, а при виявленні "пустих структур" – 100 %.

Роботи методом ЕПНГ у Дніпровсько-Донецькій западині (ДДЗ) в минулі роки виконані на багаточисельних еталонних родовищах (Яблунівське, Комунівське, Сахалінське, Волошківське, Андріяшівське, Леляківське, Мільківське, Щурівське, Дружелюбівське, Новотроїцьке, Малосорочинське, Семиреньківське, Олифірівське, Опошнянське, Лиманське, Дмухайлівське, Кременівське, Новоселівське, Пролетарське, Богатойське) і прогнозних участках (Дорожньому, Потичанському, Східно-Новоселівському, Західно-Новоселівському та ін.). Висока ефективність методу підтверджена бурінням і документами виробничих підприємств, на площах яких виконувались ці роботи.

Дуже важливі результати були отримані у той час на Волошківській площі у північно-західній частині западини. Тут на моноклінальному схилі Срібненської депресії параметричною свердловиною № 314 було встановлено унікальний газоконденсатний поклад у літолого-стратигафічній пастці верхньовізейського продуктивного горизонту (ПГ) В-20. Як було виявлено пізніше [2], пастка являє собою складно побудоване мілководно-морське піщане барове тіло, яке сформувалось на палеопідняті в алексинський час на розмитій поверхні верхньотульських відкладів, сформованій регіональним передалексинським регіональним перерівом в осадконакопиченні. Після відкриття покладу стало питання, наскільки він буде розповсюджений уверх по моноклінали. В результаті виконаних робіт по наміченому профілю ЕПНГ була встановлена верхня границя покладу на моноклінали, яка була підтверджена наступним бурінням. Якби у той час були враховані наші рекомендації по моделі пастки і були проведені деталізаційні роботи методом ЕПНГ на цій ділянці, то були б зекономлені значні кошти, які були витрачені на буріння зайвих пошукових та розвідувальних свердловин на цій ділянці, яка стала полігоном для дослідження.

Слід зупинитись на дослідженнях методом ЕПНГ, виконаних на крупному газоконденсатному Яблунівському родовищі, де була пробурена значна кількість пошукових та розвідувальних свердловин. За даними буріння було проведено контур родовища, який не співпадав з контуром за даними ЕПНГ і був значно меншим. За нашою рекомендацією була пробурена свердловина № 7, яка дозволила приростити значні запаси газу і конденсату.

Крім того, слід відзначити, що цей метод показав високі можливості при пошуках та оконтурюванні підсольових покладів у Білорусії та складних "шнуркових" покладів у Краснодарському краї Росії. Так, у Прип'ятському прогині Білорусії на Осташковичському нафтовому родовищі оконтурені поклади в девонських відкладах на глибині від 2,5 до 4,0 км під соляною покришкою потужністю 2,5-3,0 км, що підтверджено бурінням. Раніше вважалось, що сіль є ідеальною покришкою.

На жаль, незважаючи на ці успіхи методу ЕПНГ, широке впровадження його у виробництво в минулі часи стримувалось витратним механізмом геологорозвідувальних

робіт, коли основним показником їх оцінки була кількість пробурених погонних метрів, а не їх віддача. Але навіть у тих умовах виробничі геологорозвідувальні підприємства, які активно використовували ці нові прогресивні технології (наприклад, трест "Полтавнафтогазрозвідка" завдяки відомому в Україні фахівцю, головному геологу В.І. М'ясникову), отримували мільйонні економічні ефекти за рахунок надійного прогнозу нафтогазоносності, виключення із планів буріння вже запланованих проектних свердловин, які попадали за межі виявленого методом ЕПНГ прогнозного контуру покладів і, таким чином, приводили до значного здешевлення пошуків та розвідки нових родовищ та прискореного їх відкриття.

Більше 30 років тому на шельфах Чорного і Азовського морів на родовищах Голіцина та Стрілковім першими модифікаціями методу ЕПНГ вперше були визначені контури усіх ПГ, а підняття Шмідта до буріння свердловин прогнозувалось за цим методом як продуктивне, що потім було підтверджено бурінням. Подальше проведення цих робіт на Чорноморському шельфі було призупинено у зв'язку зі структурними змінами і складнощами в організації робіт – підпорядкування морської геофізики України безпосередньо Міністерству геології СРСР і його підрозділу "Сєвморгео".

За часів незалежності України тільки завдяки зусиллям Мінекоресурсів України, Державної геологічної служби України, НАК "Нафтогаз України", ДП "Чорноморнафтогаз", ДГП "Укргеофізика" у 2002-2003 рр. вперше були проведені роботи методом ЕПНГ на 4-х структурах Прикерченського шельфу Чорного моря (Суботіна, Абіха, Південно-Керченській та Глибокій) для розбраковки їх за перспективами нафтогазоносності. За цими результатами нами була дана рейтингова оцінка нафтогазоносності вивчених структур і найбільш перспективною з них виявилась структура Суботіна, де в межах аномалії ЕПНГ пропонувалось буріння першої на Прикерченському шельфі параметричної свердловини. Свердловина паралельно виконала як параметричні, так і пошукові задачі. Було відкрите перше у цій принципово новій зоні шельфу Суботінське нафтове родовище. Пробурені у подальшому розвідувальні свердловини підтвердили встановлений методом ЕПНГ контур родовища.

У 2000-2009 рр. Науково-впроваджувальною фірмою "НДРнафтогаз" за участю фахівців Чернігівського відділення Українського державного геологорозвідувального інституту у Дніпровсько-Донецькій западині роботи з прогнозування нафтогазоносності методом ЕПНГ були виконані на 36 структурах, прогнозних ділянках і 13 родовищах, які служили еталонами. За результатами цих робіт 24 об'єкти прогнозувались як перспективні (14 – високоперспективні, 10 – слабоперспективні) та 12 – безперспективні. На 13 структурах пробурено пошукові свердловини, з яких 12 свердловин підтвердили видані нами позитивні та негативні прогнози, що свідчить про високу ефективність методу. Це дозволило відкрити, розширити та уточнити контур 6 газоконденсатних та нафтових родовищ у ДДЗ (Південно-Берестівське, Східно-Рогінцівське, Східно-Петренківське, Чкалівське, Кавердинське (Баранівське склепіння) – в умовах антиклінальних структур і Вакулівське – на моноклінальному схилі в умовах літолого-стратиграфічних пасток).

Крім перевірки на нафтогазоносність прогнозних структур та ділянок, які рекомендувались замовниками робіт у різних геотектонічних зонах ДДЗ ("Чернігівське ДРГП", НАК "Нафтогаз України", ДК "Укргазвидобування", ГПУ "Шебелинкагазвидобування", ГПУ "Харківгазвидобування, ВАТ "Укрнафта, "ЗАТ "Пласт"), за межами цих об'єктів попутно виявлено ще низку аномалій ЕПНГ, які відповідають скупченням ВВ і у майбутньому повинні бути опошуковані. Більшість з них, на нашу думку, зв'язана з нетрадиційними пастками і ніякими іншими методами не прогнозувалась.

Незважаючи на наші дані, на безперспективних, за даними ЕПНГ, площах пробурено 5 пошукових свердловин, які виявились непродуктивними (одна низькопродуктив-

на), підтвердивши наш негативний проноз (Вовківцівська св. № 1, Юхтинська св. № 1, Східно-Селюхівська св. № 6, Петренківська св. № 4, Кавердинська св. № 3).

Маючи значну статистику використання методу ЕПНГ, ми не маємо фактів непідтвердження його прогнозу.

Таким чином, ефективність методу ЕПНГ доказана практикою робіт на нафту та газ як на суші, так і на морі. Метод дозволяє до буріння свердловин оперативно вирішувати такі задачі:

1) ранжування за перспективами нафтогазоносності виявлених сейсморозвідкою антиклінальних структур і в першу чергу тих, що підготовлені до пошукового буріння і включені в плани бурових робіт;

2) визначення контуру покладу, який розкрито першою свердловиною;

3) встановлення глибин залягання покладів;

4) виявлення аномалій, зв’язаних з нафтогазоносністю прогнозних пасток неантиклінальних об’єктів, у тому числі літолого-стратиграфічних, літологічних, тектонічно екранованих як у теригенних, так і в карбонатних відкладах, які прогнозуються за геологічними дослідженнями та розущільнених зонах кристалічного фундаменту, що прогнозуються за геофізичними даними;

5) оцінка запасів вуглеводнів прогнозних об'єктів у порівнянні із сусідніми родовищами.

Висока ефективність методу доказана практикою робіт на нафту та газ на більше ніж 100 прогнозних структурах та родовищах як на суші, так і на шельфі морів України, в Росії, Білорусі, Таджикистані та Узбекистані. Ефективність методу, що підтверджена бурінням в різних регіонах, сягає 80 %.

Вартість робіт методом ЕПНГ на невеликій структурі не перевищує 0,5 % вартості пошукової свердловини.

Метод ЕПНГ є практично прямим високоефективним, екологічно чистим та технічно безпечним пошуковим методом, широко випробуваним у різних геотектонічних зонах України та держав бувшого СРСР і тому він настійно рекомендується для включення в обов’язковий комплекс робіт при пошуках та розвідці нафти і газу разом із сейсморозвідкою та іншими інформативними методами до буріння свердловин, що підтримано рішеннями низки нарад НАК “Нафтогаз України”.

Він базується на сучасних комп'ютерних технологіях виконання як польових робіт, так і комплексної камеральної обробки отриманих польових даних.

Проблеми підвищення ефективності геологорозвідувальних робіт на нафту і газ, закономірностей формування родовищ вуглеводнів, нетрадиційних технологій пошуків, розвідки та інтенсифікації видобутку нафти неодноразово висвітлювались нами в численних наукових роботах та на Міжнародних науково-практичних конференціях, у тому числі Інженерної академії України та Міжнародної Інженерної академії в Україні, Росії, Німеччині, Франції, Польщі, Швейцарії, Канаді, Тунісі, Південній Кореї, Сінгапурі та інших країнах, підтримуючи високий імідж вітчизняної науки [8-24].

Незважаючи на високу ефективність методу ЕПНГ при пошуках родовищ нафти і газу в традиційних антиклінальних та неантиклінальних пастках, його широке впровадження у практику геологорозвідувальних робіт стримується економічними негараздами в країні.

Поряд із цим на даному етапі дуже багато ведеться розмов та приймаються реальні рішення щодо посилення геологорозвідувальних робіт на сланцевий газ (газ слабкопористих глинистих порід), однак на шляху їх виконання стають реальні проблеми.

Першою із таких проблем є проблема екології. Техногенні впливи на природне навколишнє середовище можуть бути катастрофічними. Для видобутку сланцевого газу

використовується багатосотметрове горизонтальне буріння по перспективній товщі. У свердловини закачується величезна кількість води, піску, небезпечних хімреагентів та проводиться гідророзрив товщі, що приводить до утворення численних тріщин, по яким газ поступає в експлуатаційну свердловину та мігрує в залягаючі вище горизонти і може викликати загазовування водоносних горизонтів і дійти до поверхні. Подібні забруднення метаном підземних вод, які використовувались населенням для пиття та підвалів спостерігались на Івано-Франківщині в значних за розмірами зонах впливу пробурених та погано законсервованих свердловин на нафту і газ.

У США, які стоять на передових позиціях у світі по видобутку сланцевого газу, видобуток його ведеться у слабонаселених районах і, незважаючи на це, питання розглядалось у Конгресі. Сенат густонаселеної Франції заборонив проведення робіт на сланцевий газ з використанням гідророзриву пластів.

В Україні ми не знайдемо такої території, де б було можливо без шкоди для здоров'я людей розвернути масштабні бурові роботи (сотні, тисячі глибоких свердловин) по густій сітці. Для буріння цих свердловин використовується величезна кількість водних ресурсів, які разом зі шкідливими хімреагентами будуть закачуватись у надра. Тільки третина бурових розчинів очищується на поверхні, але і після очищення вода цих розчинів залишається небезпечною для людей.

Друга проблема – слабка геологічна вивченість запасів сланцевого газу. В найбільш перспективному Прикарпатському регіоні оцінка геологічних (невидобувних) запасів сланцевого газу, за різними дослідниками відрізняється дуже сильно – від 2-х до 30 трлн. $м^3$. А якщо врахувати тенденції, які спостерігаються в Польщі, яка вже реально працює зі сланцевим газом, коли недавно оцінка його запасів була 1,3 трлн. $м^3$, а тепер стала 0,15 трлн. $м^3$, то перед Україною стоїть така ж проблема. За даними МЭЛ, запаси сланцевого газу складають всього 4 % від підтверджених світових запасів газу традиційних джерел.

Третя проблема – собівартість видобутку сланцевого газу. На родовищах США видобуток сланцевого газу ведеться з глибин 400-1000 м і собівартість його при значних обсягах видобутку й оновлених технологіях знизились з 250 до 90 доларів США, а відпускна ціна до 200 доларів США. Враховуючи, що перспективні сланцеві товщі в Україні залягають на значних глибинах – 2-3 км і більше, не такі масштабні обсяги можливого видобутку та відсутність власних технологій, собівартість сланцевого газу може досягати 270-300 доларів США і відповідно відпускна ціна 500-600 доларів США.

Це значно вище ніж собівартість видобутку газу із традиційних джерел в Україні, яка складає 30-35 доларів США за 1 тис. $м^3$.

У той же час навіть у США з їх величезними запасами, багаторічним досвідом та власними технологіями у найближчі роки видобуток сланцевого газу не перевищить видобуток з традиційних джерел.

В Україні до розгортання широкомасштабних робіт по видобутку сланцевого газу необхідно провести серйозні науково-дослідні та експериментальні роботи по реальній оцінці запасів сланцевого газу, газу центрально-басейнового типу та можливостей їх видобування з врахуванням впливу вищезгаданих проблем.

Незважаючи на це, Україна вже підписала 5 меморандумів з різними зарубіжними фірмами на видобуток сланцевого газу. При цьому ще не видано жодного дозволу на проведення робіт.

Науковцями Чернігівського відділення Українського державного геологорозвідувального інституту виконані прогнозні дослідження та видані численні практичні рекомендації, спрямовані на підвищення ефективності геологорозвідувальних робіт на нафту і газ [4; 5]. Реальне впровадження у виробництво цих рекомендацій на пошуки нових родовищ нафти і газу як в антиклінальних, так і нетрадиційних літологічних, літолого-

стратиграфічних, тектонічно екранованих, комбінованих пастках осадочних відкладів та тріщинуватих зонах кристалічного фундаменту можливе лише при широкому використанні для їх розбракування за перспективністю методу електрофізичного прогнозу нафтогазоносності (ЕПНГ) до буріння пошукових свердловин, який доказав свою оперативність, ефективність та економічність на багатьох об'єктах ДДЗ та шельфах Чорного і Азовського морів. Ми постійно привертали увагу до цієї проблеми не тільки виробників та науковців, але і високі державні структури [3].

Виходячи з викладених матеріалів, ми впевнені, що у найближчі 10-20 років в Україні ми не зможемо суттєво витіснити видобуток традиційного газу з антиклінальних і неантиклінальних пасток сланцевим газом. Тільки широке впровадження у практику запропонованого пошукового комплексу сучасної сейсморозвідки, методу електрофізичного прогнозу нафтогазоносності та геохімічних досліджень на традиційних антиклінальних і неантиклінальних структурах значно підвищить ефективність геологорозвідувальних робіт на нафту і газ, приведе до прискореного відкриття та розвідки нових родовищ та реально зміцнить паливно-енергетичну незалежність держави.

Список використаних джерел

1. Кривошеев В. Т. Секвенс-стратиграфические и литолого-палеогеографические исследования при прогнозе неструктурных ловушек в Днепровско-Донецком нефтегазоносном бассейне / В. Т. Кривошеев, Е. З. Иванова, В. В. Макогон // Сборник материалов Международной научно-практической конференции "Литологические и геохимические основы прогноза нефтегазоносности". – Санкт-Петербург: ВНИГРИ, 2008. – С. 606-614.
2. Лукин А. Е. Опыт прогнозирования и поисков залежей нефти и газа в песчаных телах / А. Е. Лукин, В. Т. Кривошеев и др. // Советская геология. – М., 1986. – № 1. – С. 35–44.
3. Кривошеєв В. Т. Роль регіональних перерирів осадконакопичення візейського комплексу ДДЗ у формуванні пасток вуглеводнів та оцінка їх нафтогазоносності / В.Т. Кривошеєв, Є.З. Іванова, В.Д. Кукуруза // Нафта і газ України-96: матеріали науково-практичної конференції. Том І. – Харків, 1996. – С. 66-68.
4. Підвищення ефективності геологорозвідувальних робіт на нафту і газ у зв'язку з проблемами стратифікації розрізів та кореляції продуктивних горизонтів нижньокам'яновугільних відкладів ДДЗ / В. Т. Кривошеєв, В. В. Макогон, Є. З. Іванова, О. В. Пекельна // Тези доповідей на VI Міжнар. конф. "Крим - 2005" Геодинаміка, сейсмічність та нафтогазоносність Чорноморсько-Каспійського регіону. – Сімферополь, 2005. – С. 101-106.
5. Кривошеєв В. Т. Будова, літолого-фаціальна зональність турнейсько-візейського нафтогазоносного комплексу Дніпровсько-Донецького басейну та проблеми світної стратифікації / В. Т. Кривошеєв, Є. З. Іванова, В. В. Макогон // Збірник наукових праць Інституту геологічних наук НАН України. – 2010. – Вип. 3. – С. 263-270.
6. Літолого-палеогеографічні карти турнейсько-візейських нафтогазоносних відкладів ДДЗ на основі сучасної стратифікації / В. Т. Кривошеєв, В. В. Макогон, Є. З. Іванова, О. В. Пекельна // Збірник наукових праць УкрДРГІ. – К., 2007. – № 2. – С.148-160.
7. Кривошеев В. Т. Литолого-стратиграфические, литологические и тектонические ловушки Днепровско-Донецкого бассейна – основной резерв ГРР на нефть и газ / В. Т. Кривошеев, Е. З. Иванова, В. В. Макогон и др. // Материалы Международной научно-практической конференции "Неструктурные сложнопостроенные ловушки – основной резерв прироста углеводородного сырья в России". – Санкт-Петербург: ВНИГРИ, 2005. – С. 81-86.
8. Новые направления геологоразведовальных работ и методы их проведения – главный резерв наращивания ресурсов нефти и газа в Украине / В. Т. Кривошеев, Е. З. Иванова, В. Д. Кукуруза и др. // Вісник Інженерної академії України. – 1999. – № 2-3. – С. 94-98.
9. Підвищення ефективності геологорозвідувальних робіт на нафту і газ у зв'язку з проблемами стратифікації розрізів та кореляції продуктивних горизонтів нижньо-камяновугільних відкладів ДДЗ / В. Т. Кривошеєв, Є. З. Іванова, В. В. Макогон, О. В. Пекельна, З. П. Шев'якова // VI Международная конференция "Геодинамика, сейсмичность и нефтегазоносность Черноморско-Каспийского региона". – Гурзуф, 2005. – С. 101-106.

10. Прогнозні пастки нафти і газу глибокозанурених турнейських, нижньовізейських, нижньотульських відкладів ДДЗ та шляхи підвищення ефективності геологорозвідувальних робіт / В. Т. Кривошеев, Є. З. Іванова, В. В. Макогон та ін. // Науково-технічна конференція "Перспективи нафтогазоносності глибокозанурених горизонтів осадових басейнів України". – Яремче, 2005. – С. 125-131.

11. Кукуруза В. Є такі технології (Українські вчені пропонують метод, що дає можливість "побачити" нафтові і газові родовища з поверхні Землі й визначити глибину їх залягання) / Валентин Кукуруза, Вадим Кривошеєв // Голос України. – 1995. – № 224.

12. Кукуруза В. Д. Геоэлектрические факторы в процессах формирования нефтегазоносности недр / Кукуруза В. Д. – Киев, 2003. – 415 с.

13. Кукуруза В. Д. О геоэлектрических факторах, влияющих на региональное распределение нефтяных и газовых залежей в пределах нефтегазоносных областей / В. Д. Кукуруза, В. Т. Кривошеев // Матеріали 8-ї науково-практичної конференції "Нафта і газ України". – Судак, 2004. – С. 154-155.

14. Кукуруза В. Д. Новая геоэлектрическая концепция нефтегазонакопления и возможности ее использования для открытия крупных месторождений нефти и газа / В. Д. Кукуруза, В. Т. Кривошеев // The fifth international scientific forum aims for future of engineering science – AFES 2004. Proceedings. – Paris, France: 2004. – P. 84-87.

15. Современные электродинамические методы прогнозирования нефтегазоносности и интенсификации нефтедобычи / В. Кукуруза, В. Кривошеев, Е. Иванова и др. // The fifth international scientific forum "Aims for future of engineering science - AFES 2004". Proceedings. – Paris, France: 2004. – P. 80-83.

16. Комплексування сучасних традиційних та нетрадиційних методів пошуків і розвідки родовищ – основа ефективної підготовки нафтогазової бази України / В. Т. Кривошеєв, В. Д. Кукуруза, В. В. Гладун та ін. // Матеріали Міжнарод. наукової конференції "Вторинні природні резервуари та неструктурні пастки як об'єкти істотного приросту запасів вуглеводнів в Україні". – Харків, 2006. – С.130-132.

17. Эффективные инженерные геолого-геофизические технологии поисков и разведки месторождений в старых нефтегазодобывающих бассейнах / В. Т. Кривошеев, В. Д. Кукуруза, Е. З. Иванова и др. // International scientific forum aims for future of engineering science - AFES 2006.– Davos Congress Centre, Switzerland: 2006. – P. 205-207.

18. Рациональный комплекс геологических и прямых методов при поисках и разведке месторождений в старых нефтегазоносных регионах / В. Т. Кривошеев, В. Д. Кукуруза, Е. З. Иванова и др. // Материалы Республиканской научно-практической конференции "Эффективные пути поисков, разведки и разработки залежей нефти Беларуси". – Гомель, 2006. – С. 103-108.

19. Пути комплексирования современных традиционных и нетрадиционных методов – основа эффективных поисков и разведки месторождений нефти игаза в ловушках различного типа / Вадим Кривошеев, Валентин Кукуруза, Евгения Иванова и др. // The eighth international scientific forum "AIMS FOR FUTURE OF ENGINEERING SCIENCE - AFES 2007". Proceedings. - Winnipeg (Canada), Seoul (South Korea), 2007. – С. 61-64.

20. Кривошеев В. Т. Экономические и экологические проблемы освоения суши и морских акваторий / В. Т. Кривошеев, Е. З. Иванова, В. Д. Кукуруза // Сборник научных трудов "Перспективные задачи инженерной науки". Вып. 10. – Днепропетровск: GAUDEAMUS, 2009. – С. 134-137.

21. Про необхідність посилення геологорозвідувальних робіт на нафту і газ на Прикерченському шельфі Чорного / В. Т. Кривошеєв, В. Д. Кукуруза, Є. З. Іванова та ін. // Тезисы докладов VIII Международной конференции "Крым -2009" – "Азово-Черноморский полигон изучения геодинамики и флюидодинамики формирования месторождений нефти и газа". – Симферополь: Агео, 2009. – С. 124-126.

22. Перспективы использования новых нефтегазовых технологий при поисках и эксплуатации месторождений на шельфах морей и океанов / Вадим Кривошеев, Валентин Кукуруза, Евгения Иванова и др. // Сборник научных трудов "Перспективные задачи инженерной науки". Вип. 10. – Днепропетровск: GAUDEAMUS, 2009. – С. 167-170.

23. Проблемы экономики, экологии и энергосбережения при освоении нефтегазовых ресурсов суши и морских акваторий / Вадим Кривошеев, Евгения Иванова, Валентин Кукуруза и др.

// Сборник научных трудов “Перспективные задачи инженерной науки”. Вип. 10. – Днепропетровск: GAUDEAMUS, 2009. – С. 156-161.

24. Кривошеев В. Закономерности формирования и размещения месторождений нефти и газа в Центральной и Юго-Восточной Азии на основе геоэлектрической концепции нефтегазоносности недр / Вадим Кривошеев, Валентин Кукуруза, Евгения Иванова // The eighth international scientific forum “AIMS FOR FUTURE OF ENGINEERING SCIENCE - AFES 2007”. Proceedings. - Winnipeg (Canada), Seoul (South Korea), 2007. – С. 78-84.

В. Д. Кукуруза, академік Інженерної академії України
Науково-впроваджувальна фірма “НДРнафтогаз”

В. Т. Кривошеєв, академік Інженерної академії України
Чернігівське відділення УкрДГРІ, м. Чернігів, Україна

Є. З. Іванова, академічний радник Інженерної академії України
Чернігівське відділення УкрДГРІ, м. Чернігів, Україна

СУЧАСНЕ НАУКОВЕ ПОЯСНЕННЯ ТА ІНЖЕНЕРНІ МОЖЛИВОСТІ ПОПЕРЕДЖЕННЯ “ЗАГАДКОВИХ” КОРАБЕЛЬНИХ І АВІАЦІЙНИХ КАТАСТРОФ

Незвичайні явища в атмосфері, на суші і в океанах, “загадкові” корабельні й авіаційні катастрофи завжди привертали увагу людей. Завіса “таємничості” до цього часу приховує причини численних морських та повітряних катастроф і тим самим змушує багатьох дослідників припускати існування якихось незвичайних, надприродних, нез’ясованих речей. Цю завісу відкрили дослідження вченого геолога-геофізика, доктора геолого-мінералогічних наук, академіка Українской нафтогазової академії та Інженерної академії України В.Д. Кукурузи, описані в книзі “К раскрытию тайн “загадочных” катастроф в Бермудском треугольнике и Черном море” [1]. Розробник низки нетрадиційних геоелектродинамічних методів прогнозування нафтогазоносності надр і інтенсифікації нафтовидобутку на основі даних сучасної науки професійно аналізує цю проблему, намагаючись визначити, що в ній реального, а що є плодом фантазії. Ці дослідження становлять інтерес не тільки для професіоналів, а й для широкого кола читачів, які цікавляться природними явищами, життям нашої планети.

Чеський учений-природознавець Зденек Кукал у своїй книзі «Загадки Бермудского треугольника. Вымыслы и реальность» провів розбір і аналіз 50 випадків найбільш загадкових корабельних і авіаційних катастроф у Бермудському трикутнику. Науковець спробував доказати, що в цьому нічого загадкового та протиприродного не відбувається і попереджає від зловживання таких висловлювань, як «таємничий» та «загадковий», бо, на його погляд, в дійсності нічого такого, що виходило б за рамки природних і зрозумілих явищ, виявлено не було. В результаті всі нерозкриті катастрофи розглядаються ним тільки з позиції простих можливих аварійних ситуацій, які визвані або сильним штормом, або технічними неполадками, або людським фактором. Але оскільки всі ці фактори проявляються одноразово, то виділити серед них основний практично неможливо. Незнання і нерозуміння основних причин «загадкових» катастроф тільки сприяє популярності трикутника, тому що в цьому випадку з’являються різні версії і гіпотези, які супроводжуються описами різноманітних таємничих явищ. Наші науково обґрунтовані погляди на цю проблему наводимо нижче.

У першій частині книги приведені загальні відомості про Бермудський трикутник, глибинну будову Землі, геотектонічні процеси, які відбуваються в її надрах, а також розглянуто приклади незвичайних морських і повітряних катастроф та аналіз їх причини.

Для поняття «грізних» природних явищ в атмосфері, на морі і на суші читачу надана можливість знайомства як з джерелом небезпечних явищ, які спричиняються наступом хвиль (урагани, торнадо, цунамі, вихори течій Гольфстріму), так і з геотектонічними процесами в земній корі (зони субдукції, землетруси, виверження вулканів).

На основі аналізу сучасних даних про будову Землі й анатомію земної кори з врахуванням електродинамічного стану Землі були детально розглянуті і розкриті джерела природних явищ у Бермудському трикутнику та визначений їх зв'язок із «загадковим» зникненням суден та літаків. Очевидно, тому З. Кукал, не заглиблюючись у суть тектонічних процесів земної кори, не зміг дати відповіді на головне питання відносно природи «електричних явищ», які визивають, за свідченням очевидців, свічення на крилах літаків, на щоглах кораблів та інших виступах, «таємничі» магнітні збурювання, збої в роботі електроустаткування і радіоапаратури, розрядку акумуляторів, зупинку двигунів та ін. У цьому питанні він признається, що «ці «електричні явища», за свідченнями деяких авторів, продовжуються, як правило, декілька хвилин і лише іноді декілька годин. У деяких випадках вони супроводжуються збудженням магнітної стрілки і світловими явищами. Не вважаю себе спеціалістом у цій галузі, тому з цього питання нехай висловлюються інші» [2, с. 362]. Якщо б З.Кукал звернув на це увагу, то побачив би, що всі подібні електричні ефекти безпосередньо обумовлені «тихими» землетрусами, «штовхачом» яких у Бермудському трикутнику є діючий глибоководний жолоб Пуерто-Рико, в якому атлантична океанічна кора підсовується під континентальну (материкову) плиту на глибині близько 9000 м. При цьому породи океанічної кори зазнають інтенсивного стиснення, зм'ятість і прогрів, у результаті чого із деформованої зони океанічної кори безперервно витісняється велика кількість термальних вод, які по розущільнених зонах порід (в основному по деформованих зонах розломів) проникають у водне середовище океану разом з розчиненими в них природними газами і тим самим створюють на його поверхні катастрофічні умови для суден і літаків. Останнє дало змогу виявити основних «винуватців» усіх загадкових трагедій не тільки в районі Бермудського трикутника в його класичній формі, але і далеко за його межами в Атлантичному океані та в інших місцях планети. До них відносяться так звані морські та повітряні електромагнітні бурі.

В дійсності, в Бермудському трикутнику морські електромагнітні бурі обумовлені двома факторами: розгазованими термальними водами і електричними полями високої напруги, які виникають над епіцентрами землетрусів. Вони з'являються, звичайно, несподівано в різних місцях і в різні пори року, діють короткочасно – від декількох хвилин до декількох годин. Ці бурі мають різну інтенсивність і можуть охопити величезні території, які досягають сотень квадратних кілометрів. Їх формування супроводжується спучуванням морської поверхні, утворенням величезних кругових вихорів різного діаметра з глибокими коловоротами, появою високих хвиль, ураганних вітрів, величезних грозових кучово-дощових хмар вертикального розвитку, високими електричними полями, сильними магнітними збудженнями, іонізацією атмосфери і турбулентністю повітря. Всі вказані фактори, які проявляються одночасно, можуть привести до того, що в районі появи потужної морської електромагнітної бурі будь-який корабель може переламатись на одній або двох високих хвилях, перевернутись або зануритись носовою або кормовою частиною в глибоку воронку коловороту. Виникнення аномального електричного поля ще більше посилює створену аварійну ситуацію, тому іонізація повітря, яка виникає при цьому, виводить з ладу електроустаткування, радіоапаратуру і двигуни шляхом витоку струму та замикання в електричних ланцюгах, що також може привести до пожеж і вибухів. Це стосується і літаків, які випадково потрапили в зону дії морської електромагнітної бурі.

Про подібну аварійну ситуацію свідчить трагедія 19-ї ланки з 5-ти бомбардувальників-торпедоносців типу «Эвенджер» США, які безслідно зникли 5 грудня 1945 року се-

ред білого дня за сприятливої погоди біля східного побережжя Флориди. Не випадково в цьому районі, де проходив навчальний політ ескадрильї (в 160 км на схід від авіабази у Форт-Лодердейлі), несподівано зіпсувалась погода, море враз стало неспокійним, з'явився сильний вітер і висока хвиля. Через щільну хмарність екіпаж не зміг навіть зорієнтуватись за сонцем. Було отримано тривожне повідомлення: «У нас аварійна ситуація, збились з курсу. Не бачимо Землю». Очевидно, електромагнітна буря вивела з ладу всі радіокомпаси, які були на літаках. З часом зник і радіозв'язок.

На місце зникнення ескадрильї було направлено великий «літаючий» човен «Мартін Марінер» з тринадцятьма членами екіпажу. Гідроплан призначався спеціально для рятівних робіт і міг зробити посадку навіть на штормовому морі. Але гідролітак на місці трагедії, не знайшовши жодного із зниклих, вибухнув.

Експерти нічого не розуміли: куди в такому обмеженому районі могли безслідно зникнути шість літаків з 27 пілотами на борту? Комісія завершила свою роботу без жодних результатів. У книзі цей випадок, як і інші, розглядається більш детально і подано найбільш обґрунтоване його рішення.

З вказаних позицій розкриваються і можливі причини виникнення суден-примар, яких причислили до когорти «летючих голландців», і таємниці загибелі атомних підводних човнів США «Трешер» та «Скорпіон», в аварійних ситуаціях яких головну роль могла зіграти дегазація Землі. Останнє активно проходить у Бермудському трикутнику в зоні субдукції глибоководного жолоба Пуерто-Рико і в зоні Серединно-Атлантичного (рифтового) хребта, для якого характерні часті землетруси.

Слід відзначити, що вказаний механізм утворення морської електромагнітної бурі має глобальний характер проявлення, в основному, в зонах, які розташовані в областях підвищеної сейсмічності.

Друга частина книги присвячена виявленню факторів, які призводять до незвичайних сучасних катастроф як на суші, так і на морі, що не розкриті до цього часу.

Як не надійно цей світ зберігає свої таємниці, серед них немає таких, які б неможливо було б дослідити, розпізнати, пояснити. Природа весь час задає людині важливі завдання, і людина обов'язково їх вирішує, для чого створює все більш досконалі методи і засоби пізнання.

У книзі приведені обґрунтовані докази наявності в природі різноманітних тектонічних і геоелектричних факторів, тісно зв'язаних з глибинними процесами земної кори, які діють як єдиний механізм у системі Земля–Атмосфера. В результаті такого підходу до розкриття причин «загадкових» корабельних і авіаційних катастроф на сучасному етапі розвитку науки стало можливим виявити основні природні явища, які можуть створювати аварійні ситуації для кораблів та літаків, і прийти до таких висновків.

1. Аналіз «загадкових» катастроф у Бермудському трикутнику показує, що в цьому районі ніколи не проходили події або різні "таємничі явища", які б неможливо було науково обґрунтувати. Різні любителі загадок і письменники-фантасти, які відгадували одну таємницю за іншою, залучали до цього надприродні сили. Ті, хто намагався доказати зворотне, не змогли цьому перешкоджати, бо мали недостатні знання і переконливі аргументи, мали лише поверхневий підхід до проблем Бермудського трикутника. Вони обмежувались професіоналізмом у морській справі, були переконані, що основними винуватцями у всіх аварійних ситуаціях могли бути тільки три фактори: шторм, технічні неполадки або недоліки у підготовці екіпажу.

2. Результати досліджень природних явищ, підмічених очевидцями і не врахованих експертами, переконливо вказують на причетність до катастроф суден та літаків тектонічних процесів, що відбуваються у надрах Землі, тому що тільки вони, як відомо, можуть спричинити несподіваний і швидкоплинний сильний шторм за гарної погоди, во-

дяні вихори різних розмірів, різноманітні електричні свічення, магнітні збудження різної інтенсивності і т.п. Всі ці явища характерні для морської електромагнітної бурі, які в Бермудському трикутнику виникають над епіцентром «тихого» землетрусу, обумовленого зануренням океанічної кори під континентальну в зоні глибоководного жолоба Пуерто-Рико. Саме тут проходить інтенсивне спливання термальних вод з розчиненим природним газом, віджатих з океанічних порід, що породжує на поверхні моря і в атмосфері для кораблів та літаків аварійні ситуації, а аномальні електричні поля, які виникають при цьому, тільки погіршують стан. Така буря виникає несподівано в різних місцях, в різні пори року і проявляються локально, швидкоплинно і з різною інтенсивністю. Отже, морські і повітряні електромагнітні бурі в Бермудському трикутнику є основними причинами "загадкового" зникнення кораблів і літаків (у тому числі й атомних підводних човнів), які любителями загадкових явищ пояснювались впливом таємничих і навіть надприродних сил.

3. На суші над епіцентрами землетрусів переважають атмосферно-електричні явища – повітряні електромагнітні бурі, які також, як і на морі, зв'язані з глибинними процесами земної кори, які генерують в осередках землетрусів сильні електричні поля. Останні приводять до іонізації газів (азоту і кисню) атмосфери між земною поверхнею й іоносферою, що нагадують собою іонну плазму, якою є іоносфера. Виникнення в атмосфері подібної зони створює потужний несхідний потік повітря, який переміщується зверху вниз позитивними іонами, характеризується високою турбулентністю і електропровідністю. Попадання літака в таку іонізовану зону загрожує йому катастрофою, тому що в ній літак довільно переходить у штопор з одночасним виходом з ладу радіоапаратури і електроустаткування. При цьому слід знати, що концентрація іонів достатньо складно змінюється з висотою. Перший максимум її спостерігається поблизу земної поверхні (вплив розпаду радіоактивних елементів), другий на висоті 14-18 км (космічні промені). Вище цього максимуму концентрація зменшується з висотою (приблизно до 40 км), а потім швидко зростає і досягає максимуму на висоті 60-80 км – це так званий шар D, який прийнято вважати нижньою границею (біля 60 км) іоносфери. При цьому можемо припустити, що над епіцентрами «тихих» землетрусів буде в основному виникати підвищена іонізація повітря між землею і першим максимумом концентрації іонів, а над сильними землетрусами – між землею та іоносферою (шар D).

Доказом цьому є однотипне падіння з висоти 10000 м літаків різних типів, таких як, наприклад, аеробуса А-310 під Новокузнецьком у 1994 році над трансмерідіональним Междуреченським розломом, який «засвітився» в той час; літака ТУ-154 під Хабаровськом у 1954 році в районі, який за сейсмічним районуванням відноситься до зони з сейсмічністю 5-6 балів, а також лайнерів МД-11 (швейцарської авіакомпанії) в 1998 році і «Боінг-767» (єгипетської авіакомпанії) в 1999 році біля побережжя Массачусетса США, де в минулому активно проявлялись вулканізм і землетруси, але і зараз вони про себе іноді нагадують. Всі вказані літаки самовільно і неочікувано для екіпажів переходили в штопор з втратою радіозв'язку, вимкненням двигунів і «чорних» ящиків.

4. У гірських районах породи накопичують великий запас потужної енергії і близькі до руйнування. В місцях максимальних пружних напружень суттєво збільшується п'єзоелектрика, а в осередках землетрусів вона різко зростає за рахунок електризації кристалічних порід у процесі тріщиноутворення. Все це призводить до того, що на гірських вершинах у зонах активних землетрусів часто значно збільшуються від'ємні заряди і тим самим складається небезпечна ситуація для польотів літаків, оскільки вони, будучи позитивно зарядженими, довільно під дією електростатичного поля притягаються до вершин, що суттєво спотворює намічені маршрути польотів, у результаті чого літаки часто розбиваються в горах. До подібних трагічних випадків можна віднести зіткнення з гірськими хребтами в Ірані літаків Ан-140 та ТУ-154 в 2002 році, Як-40 в 2001 році. Теж саме трапилось і

з літаком Як-42 в Греції в 1997 році. Аналогічна катастрофа трапилась на острові Шпіцберген з лайнером ТУ-154 в 1996 році, який при посадці врізався в гору. Всі вказані райони авіакатастроф відносяться до зон з підвищеною сейсмічністю на земній кулі.

5. Аналіз аварійних ситуацій, які трапились у Чорному морі в останнє десятиріччя, показав, що вони нагадують ті ж трагічні картини, які спостерігались у Бермудському трикутнику. Це дозволило розглядати Чорне море як аналог Бермудського трикутника.

Чорноморський басейн утворився в результаті деструкції і локального розтягування континентальної літосфери на фоні регіонального стиснення, зв'язаного з взаємодією Аравійсько-Африканської і Євроазійської тектонічних плит.

За даними сейсмічних досліджень, виконаних в акваторії Чорного моря, встановлено, що зона зчленування глибоководної частини шельфу, який занурюється на глибину до 1000 м, з більш глибокою (центральною) частиною дна моря, яка знаходиться на глибині біля 2000 м, характеризується численними розломами, які періодично оновлюються під впливом тектонічних процесів. По цих проникних зонах у період їх оновлення в море проникають глибинні термальні води, які насичені природним газом, і за аналогією з Бермудським трикутником, також утворюють морські і повітряні електромагнітні бурі, що являють собою велику небезпеку для морського і повітряного транспорту.

Чорноморська небезпечна зона виділена на карті акваторії Чорного моря шириною біля 100 км. В її межах зникло багато суден і літаків за останні десятиріччя, тому що вона реагує на всі тектонічні процеси земних надр, які породжують землетруси. До переліку цих катастроф можна віднести катастрофи судна «Пам'ять Меркурія», теплохода «Сімба-1», суховантажу «Славутич-16», туніського судна «Аміра-1», камбоджійського теплохода «Тіксі», літака Ан-28 та ін.

Слід відзначити, що Бермудський трикутник та Чорне море є не єдиними місцями на земній кулі, де судна і літаки зникають за загадкових обставин. До них, у першу чергу, слід віднести Японське море і море Диявола. Наприклад, у 1951-1954 роках у морі Диявола потерпіли катастрофу 9 великих технічно добре оснащених вантажних суден, але тільки одне з них встигло надіслати сигнал тривоги, останні зникли миттєво і безслідно.

Природа підземних катаклізмів залишається ще повністю не розкритою, не ясною. В «підготовці» землетрусів беруть участь різні сили і фактори. Крім того, осередки більшості цих стихій розташовуються на таких глибинах, куди людина ще не може проникнути.

Безумовно одне: землетруси – не звичайні явища, а наслідок тих тектонічних рухів, які проходять у глибинах земної кулі. Тому треба всебічно дослідити закономірності цих рухів, виявити їх причини. Це дуже складне завдання, але сучасна наука його вирішить.

Ніхто не може сказати точно, як сьогодні можна підготуватися до прогнозу небезпечних явищ, які зв'язані безпосередньо з землетрусами. Ні кораблі, ні літаки не мають необхідної апаратури, яка могла б своєчасно (хоча б за декілька годин) сигналізувати, подібно барометру, про те, що «підземний ворог» може напасти. Таку апаратуру можливо і необхідно розробити.

У минулому столітті професор Н.Слігунов звернув увагу на сильні магнітні збудження, які супроводжували верненські (алма-атинські), еквадорські та ін. катастрофічні землетруси того часу. При землетрусі 1966 року в Ташкенті було відзначено свічення атмосфери над самим осередком землетрусу. Воно, очевидно, було зв'язано з різким посиленням електричного поля Землі.

На думку японських дослідників, підземній негоді передує негода атмосферна – інтенсивні опади і великі перепади атмосферного тиску. Сильні підземні поштовхи супроводжуються, як правило, грозовими електричними розрядами, нерідко при ясному, безхмарному небі. Перед початком землетрусу незвичайно, навіть дивно світиться небо. На ньому або щось яскраво полихає, або з'являються стовпи світла, іноді кулі, які спалахують. Оче-

видці землетрусів 1930 року в Японії, в Ідзу, стверджували, що свічення неба походило на сповільнений спалах блискавки. Численні свідки бачили кулі і полоси, що світилися, як при північному сяйві. Землетрус 1948 року в Ашхабаді також супроводжувався «світловими ефектами». Все це свідчить про те, що над землетрусом (в епіцентрі) з'являються різного роду передвісники, які можна заздалегідь виявляти і своєчасно вжити заходів безпеки.

6. До основних передвісників землетрусів, у тому числі морських, і повітряних електромагнітних бурь відносяться аномалії різного роду – підвищення або різке зменшення напруги електричного поля в повітрі, поява інтенсивного електромагнітного збудження, виникнення високої іонізації повітря, збільшення електропровідності атмосфери, а також зростання радіоперешкод, вихід з ладу радіоапаратури і електроустаткування, розрядження акумуляторів, зупинка двигунів та ін. Одночасно з'являються і побічні ознаки: вздуття поверхні моря, виникнення вихорів різних розмірів з глибокими коловоротами, поява високих хвиль і сильного вітру, іноді на зразок урагану, зменшення атмосферного тиску, підвищення температури поверхневих вод і повітря, насичення вод природним газом, утворення густого хмарного покриву (щільного туману), формування величезних кучово-дощових хмар вертикального розвитку, різка зміна напрямку вітру, помітне занурення корабля носовою або кормовою частиною, або його перекидання, виникнення пожежі або вибуху, розлом корпусу судна, сильна турбулентність повітря та ін. Землетрус на судні відчувається як сильний поштовх, нагадує зіткнення його з підводною твердою перешкодою.

Все це виникає над епіцентрами землетрусів раптово, воно швидкоплинне і має різну інтенсивність залежно від глибини осередка землетрусу і його магнітуди. Мабуть, з цієї причини різні наукові експедиції, які працювали в Бермудському трикутнику, з незвичайними природними явищами безпосередньо не зустрічались і тому не могли їх дослідити з наукових позицій.

Вся історія науки показує нам: у природи немає нічого непізнаного – людина все глибше і точніше пізнає її закономірності. Скоро будуть розроблені технічні способи, які дозволять за декілька хвилин точно передбачати не тільки місце, але й силу і час виникнення морської або повітряної електромагнітної бурі. Для цього необхідно, щоб учені і спеціалісти серйозно зайнялись не тільки вивченням фізичної природи незвичайних природних явищ, умов їх утворення та оцінкою безпеки для морського і повітряного транспорту, але й розробкою приладів і апаратури, які дозволяють (у першу чергу для літаків) вимірювати електропровідність й іонізацію повітря та вказувати на особливості їх зміни. Технічні можливості посилення безпеки кораблів і літаків практично ще не вичерпані і до того ж багато з них очевидні, і в цьому напрямку необхідно активно працювати.

Список використаних джерел

1. Кукуруза В. Д. К раскрытию тайн "загадочных" катастроф в Бермудском треугольнике и Черном море. Необыкновенное в обычном / В. Д. Кукуруза. – Киев: Карбон, 2006. – 406 с.

2. Кукал З. Загадки Бермудского треугольника. Вымыслы и реальность / З. Кукал. – М., 1989.

РОЗДІЛ І. МЕХАНОХІМІЯ

УДК 678.027.3

И.М. Кузяев, д-р техн. наук
А.А. Митрохин, канд. техн. наук
ГВУЗ «Украинский государственный химико-технологический университет», г. Днепропетровск, Украина

ОПТИМИЗАЦИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАНОТРУБОК И ВОЛОКОН

Рассмотрены проблемы получения полимерных композитов с улучшенными характеристиками при модификации нанотрубками и волокнами. Оценено влияние нанотрубок и волокон на механические свойства полимерных композитов. Предложены методики оптимизации механических характеристик с использованием ультразвукового воздействия.

Постановка проблемы

В последние годы наблюдается тенденция замены все большего количества деталей и целых узлов химического оборудования, выполненного из металлов и их сплавов, на полимерные композитные материалы. При этом в качестве базовой матрицы могут использоваться различные полимерные материалы, а в качестве наполнителей – волокна и трубки различной дисперсности, в том числе и наноразмеров.

Во многих случаях механические характеристики базовых полимеров удовлетворяют условиям функционирования рабочих узлов. Однако существуют такие режимы работы, при которых механические характеристики для полимеров без наполнителей и модификаторов уже не будут иметь необходимый уровень величин, способствующих надежной и долговечной работе машинного агрегата. В таком случае следует выполнить соответствующую модификацию базовой полимерной матрицы введением в него различного рода модифицирующих добавок, ведущее место среди которых занимают волокна и трубки, в том числе и наноразмеров.

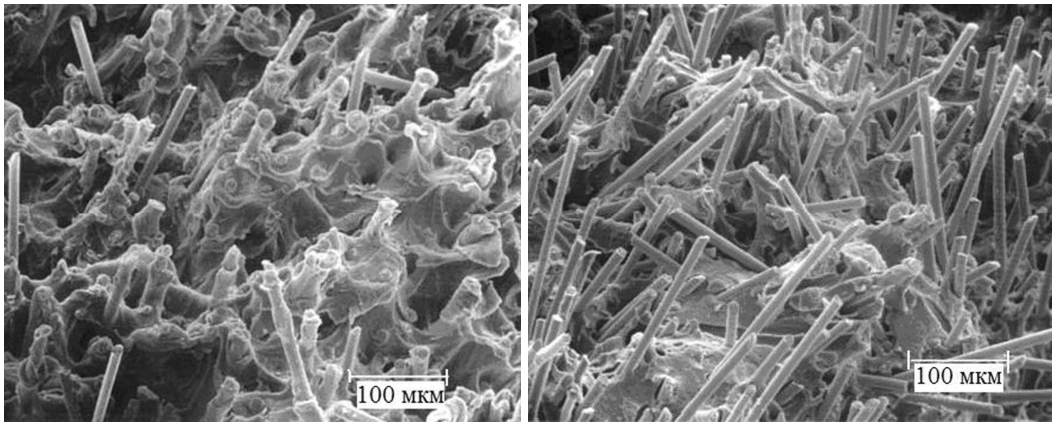
Анализ публикаций

В работе [1] исследовались механические свойства полимерных композиций, состоящих из полиамида ПА-6, этиленпропиленового каучука (ЭПК) и стеклянных волокон (СВ), обработанных четырьмя реакционно-активными силанами, а именно, ангидрида (АнС), эпоксигруппы (ЭС), функциональной группы аминов (АмС) и октила (ОС).

На рис. 1 изображены фотографии, снятые на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ-фотографии). Как показали исследования, наибольший эффект обволакивания полимерной матрицей стекловолокон наблюдается при обработке силана ангидридом. Общее количество поверхностей стекловолокон, которые не соприкасаются с полимером, в данном случае незначительно. При воздействии на силаны функциональной группой аминов контакт между волокнами и полимером практически отсутствует. При обработке силанов эпоксигруппой и октилом происходит частичное соединение стеклянных волокон с полимерной матрицей. То есть два последних случаях занимают промежуточное место между ангидрид-силаном и амино-силаном.

При этом в трех последних случаях общая площадь стекловолокон, которая не соединяется с полимерной матрицей, составляет большую часть, что отрицательно влияет на прочностные свойства полимерных композитов.

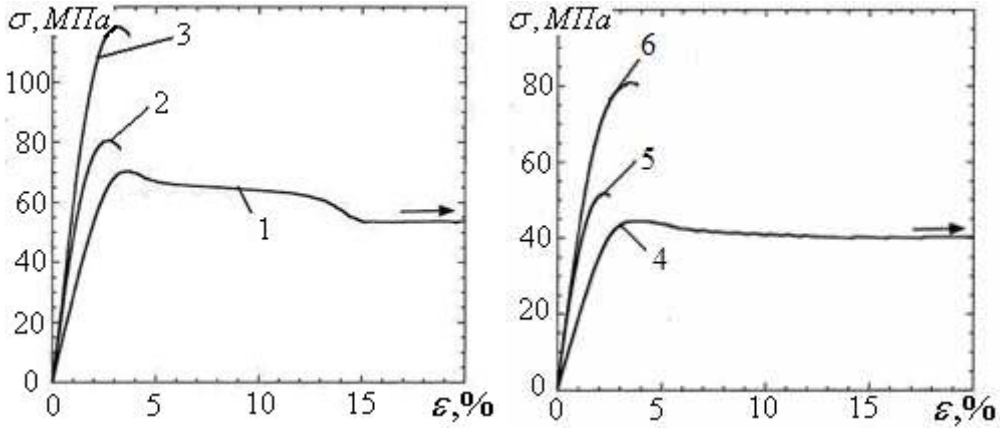
Данный пример говорит о том, что оптимизация свойств полимерных композитов может быть достигнута обработкой соответствующими модификаторами волокнистых наполнителей.



а) *б)*

Рис. 1. СЭМ-фотографии для образцов, изготовленных из композита ПА-6/ЭПК=80/20 с 30% наполнением стекловолокном для: а – ангидрид-силана; б – амино-силана

На рис. 2 представлены кривые зависимостей напряжения от деформации при различных сочетаниях компонентов.



а) *б)*

Рис. 2. Кривые зависимостей напряжений от деформаций от сочетания полиамида, этиленпропиленового каучука и силана: а – без ЭПК (1 – ПА-6, 2– ПА-6+15% СВ/ОС, 3 – ПА-6+15% СВ/АнС); б – с добавлением ЭПК в сочетании ПА-6/ЭПК=80/20 (4 – ПА-6/ЭПК, 5 – ПА-6/ЭПК+15% СВ/ОС, 6 – ПА-6/ЭПК+15% СВ/АнС)

Как следует из рис. 2, что, впрочем, наблюдается и для других полимерных композитов, при введении в полимерную матрицу жесткого наполнителя, рабочие напряжения значительно возрастают. То же самое относится и к модулю упругости, а относительная деформация при этом уменьшается.

Разработке полимерных композитов с волокнистыми наполнителями (стекловолокнами и углеволокнами) посвящено большое количество работ, среди которых можно выделить [2-7].

Значительный интерес в последние годы при разработке новых композиционных материалов вызывают наполнители на основе углеродных систем, что связано с наличием у них специфических свойств, разнообразием структуры и сравнительной дешевизной исходного продукта. Наиболее широкое распространение среди углеродных систем нашли графиты и алмазы, структура которых различна.

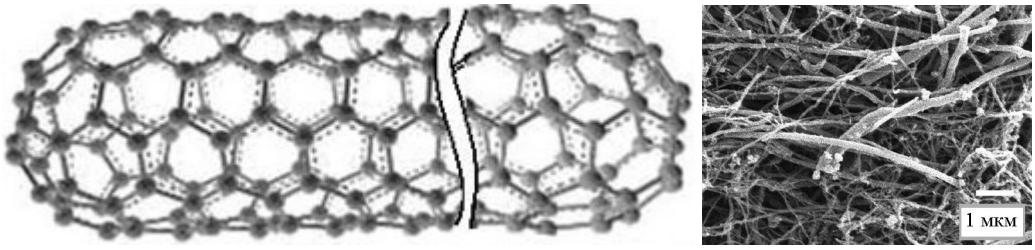
Графит обладает слоистой структурой. При этом каждый из его слоев содержит атомы углерода, которые ковалентно связаны между собой, образуя правильные шестиугольники (гексагоны) с расстоянием между ближайшими атомами, равным 0,142 нм.

Между соседними слоями действуют Ван-дер-ваальсовые силы, которые являются величинами высшего порядка малости в сравнении с ковалентным взаимодействием (расстояние между плоскостями в решетке составляет 0,337 нм). Вследствие чего слои легко скользят друг по другу. Графит нашел широкое применение для изготовления полимерных композитов триботехнического назначения, для которых необходимо добиться минимальных значений коэффициента трения и износа [8-10].

Алмаз имеет трехмерную структуру в виде тетраэдров. При этом каждый атом углерода имеет ковалентную связь с четырьмя другими, причем все атомы в кристаллической решетке расположены на одинаковом расстоянии (0,154 нм) друг от друга. Каждый из них связан с другими прямой ковалентной связью и образует в кристалле (различных размеров) одну макромолекулу, которая может иметь очень внушительные размеры. Вследствие высокой энергии ковалентных связей -C-C- алмаз обладает высочайшей твердостью, а значит и прочностью, и используется не только как драгоценный камень, но и в качестве наполнителя для композитов, используемых в металлорежущем и шлифовальном инструменте.

В 1985 г. Харольдом Крото с соавторами были открыты фуллерены, так называемая 0D форма, состоящая из 60 атомов углерода [11], образующих 20 гексагонов и 12 пентагонов. Поперечный размер такой углеродной системы составляет 0,714 нм. Такая поверхность образует сферическую форму. Это открытие было удостоено в 1996 г. Нобелевской премии по химии. Существуют фуллерены, имеющие и другое количество атомов углерода, например, 60 и 70, образующие уже сфероидальную форму.

В 1991 г. Сумио Иижима обнаружил новую 1D форму углерода, которая представляет собой продолговатые трубчатые углеродные образования, названные «нанотрубками» [12]. Хотя тут следует заметить, что подобные углеродные образования были упомянуты гораздо ранее [13]. Структуры углеродных нанотрубок изображены на рис. 3.



а) *б)*

Рис. 3. Структуры углеродных нанотрубок: а – схема однослойной нанотрубки; б – СЭМ - фотография для образца, изготовленного из композита на основе полипропилена с 4% наполнением многослойными углеродными нанотрубками [14]

Изучению свойств нанотрубок, их формы и характеру взаимодействия между ними и другими веществами, а также поведению нанотрубок в энергетических полях различного типа посвящено очень большое количество работ как теоретического направления, так и экспериментального, среди которых можно выделить [15-24].

Алотропная форма углерода в виде нанотрубок напоминает скрученный в цилиндр без шва один графитовый пласт, в результате чего получают однослойные (одноуровневые) нанотрубки (ОСНТ или SWNTs). Если взять несколько графитовых пластов, то получают многослойные (мультиуровневые) нанотрубки (МСНТ или MWNTs). При этом пласты трубок можно представить как гексагональные сетки, состоящие из углерода и расположенные приблизительно на том же расстоянии между собой, что и в графите, а именно в 0,34 нм. Следует отметить, что взаимная ориентация гексагональной сетки и продольной оси нанотрубки характеризует свернутость узловых линий углерода, их вин-

товой шаг на цилиндрической поверхности нанотрубки. Данная характеристика получила название хиральность. Величина хиральности выражается двумя целыми числами (m, n), которые указывают на местонахождение того гексагона сетки, который в результате скручивания совпадает с гексагоном (0, 0) в начале координат.

Хиральность нанотрубки можно точно определить также через угол меньший, чем 60° между осью нанотрубки и направлением, в котором соседние шестиугольники имеют общую сторону, и длиной круга цилиндра. Диаметр однослойной нанотрубки зависит от её хиральности и может быть рассчитан по формуле:

$$D = \frac{3 \cdot d_0}{\pi} \cdot \sqrt{m^2 + n^2 - m \cdot n}\,, \qquad (1)$$

где $d_0 = 0{,}142$ нм – расстояние между атомами в гексагональной сетке пласта графита.

Средний диаметр получаемых ОСНТ составляет 1,2 нм, но он может значительно изменяться, при этом трубки не всегда совершенно цилиндрические. Например, трубки (20, 20) уже склонны прогибаться под собственной массой. Среди однослойных нанотрубок особый интерес представляют нанотрубки с хиральностью (10, 10). Проведенные расчеты показали, что нанотрубки с подобной структурой склонны к проводимости, соответствующей металлам, а также имеют повышенную стабильность и устойчивость по сравнению с трубками других хиральностей.

Для многих технологических применений привлекательна высокая удельная поверхность материала нанотрубок. В процессе роста образуются случайным образом ориентированные спиралевидные нанотрубки, что приводит к образованию значительного количества полостей и пустот нанометрового размера. В результате удельная поверхность материала нанотрубок достигает значений около 600 $м^2/г$. Столь высокая удельная поверхность открывает возможность их использования в фильтрах и других аппаратах химических технологий.

Нанотрубки с открытым концом проявляют капиллярный эффект и способны втягивать в себя расплавленные металлы и другие жидкие вещества, в том числе и полимеры. Для открытия нанотрубок, то есть удаления полусферических концевых элементов (рис. *3, а*), существует несколько способов, один из которых заключается в отжиге нанотрубки при температуре 850^0 С в течение нескольких часов в потоке углекислого газа. В результате окисления около 10 % всех нанотрубок оказываются открытыми.

Модуль упругости вдоль продольной оси нанотрубки достигает до 7000 ГПа, что значительно больше, чем для самой прочной стали. Кроме того, однослойные нанотрубки могут упруго удлиняться на 16 %. Первые исследования капиллярных явлений показали, что имеется связь между величиной поверхностного натяжения жидкости и возможностью ее втягивания внутрь канала нанотрубки. При этом оказалось, что жидкость может проникать внутрь канала нанотрубки, если ее поверхностное натяжение не выше 200 мН/м.

Наноструктурированные материалы делятся на две большие группы. Материалы первой из них на 95-100 % состоят из нанотрубок. Материалы второй – нанокомпозиты, в которых нанотрубок содержится всего до 5 %. Наибольший интерес в сочетании с полимерными матрицами представляет именно вторая группа.

Проведение экспериментальных исследований

При проведении экспериментальных исследований в качестве полимерной матрицы использовались различные марки полиамида и полипропилена. При этом переработка полимерных композитов проводилась на различных экструзионных агрегатах с возможностью регулировать как технологические характеристики проведения процесса переработки, так и геометрические параметры рабочих элементов. Два из таких агрегатов представлены на рис. 4.

а) *б)*

Рис. 4. Экспериментальная часть: а – проведение экспериментов на одночервячном экструдере; б – червячно-дисковый экструдер

Одной из наиболее важных задач, которые возникают при переработке полимерных композитов, является создание условий для разделения ингредиентов, входящих в полимерную матрицу, а также их равномерное распределение по всему объему перерабатываемого материала. Особенно актуальное значение данная проблема имеет в случае переработки полимерных композитов с включением наночастиц, образующих наноагломераты за счет значительного Ван-дер-ваальсового взаимодействия [25-28]. В работе [29] разработана теория, позволяющая рассчитать энергию взаимодействия между наночастицами в наноагрегате, и предложены пути их разделения с равномерным распределением в перерабатываемой полимерной массе. При этом основным инструментарием для решения данной задачи при переработке на экструзионном оборудовании является возможность воспроизведения больших напряженно-деформационных полей за счет регулируемых сдвиговых деформаций. Для этого при проведении экспериментальной части на червячном экструдере использовались барьерные червяки, один из которых показан на рис. 5.

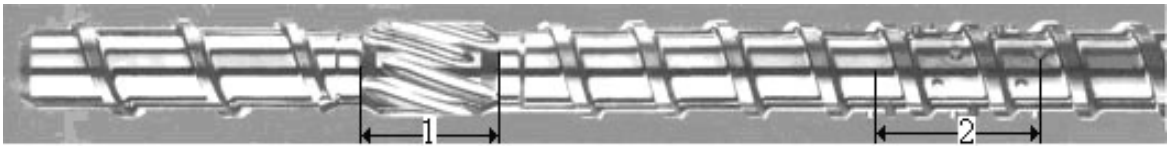


Рис. 5. Червяк: 1 – барьерная часть; 2 – смесительно-штифтовая часть

Кроме того, для интенсификации процессов разделения в зоне размещения барьерной части была установлена система ультразвуковых колебаний, то есть в данной зоне осуществлялось исследование как отдельного влияния двух силовых полей, так и взаимное воздействие ультразвуковых колебаний и больших сдвиговых деформаций. Система ультразвуковых колебаний функционировала на следующих интервалах: по частоте – f = 0÷24 кГц; по амплитуде – $A_к$ = 0÷300 мкм, с различной временной длительностью ультразвукового воздействия. В дисковом зазоре червячно-дискового экструдера также предусмотрены конструктивные системы интенсификации сдвигового воздействия на перерабатываемый материал с возможностью одновременного усиления силовых полей за счет наложения ультразвуковых волн с различными параметрами.

На рис. 6 представлен объемный график зависимости напряжений от деформаций при растяжении в зависимости от содержания нанотрубок. В качестве полимерной матрицы взят полипропилен марки 04П10/010, а нанотрубки использовались многослойные (MWNTs), внешние и внутренние диаметры которых составили 20-30 и 5-10 нано-

метра соответственно. Данный график получен при переработке на одночервячном экструдере с использованием барьерного червяка. При этом использовался режим высокоскоростной экструзии [30] с воспроизведением в барьерной зоне максимальной скорости сдвига до $\dot{\gamma}=1000$ с$^{-1}$. Кроме того, создавалось ультразвуковое воздействие с параметрами: f = 18 кГц; $A_к$ = 160 мкм.

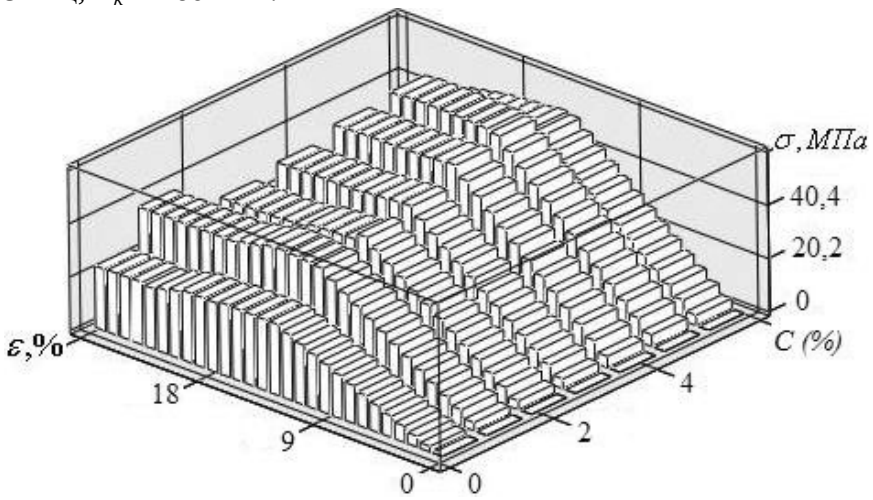


Рис. 6. Объемный график зависимости напряжения от деформации при различных концентрациях нанотрубок

Как видно из рис. 6, оптимальная концентрация нанотрубок, с точки зрения прочностных свойств полимерной композиции, составляет 5 %.

Графики, аналогичные рис. 6, получены и для других композитных материалов с различным сочетанием технологических параметров как при действии только сдвиговых деформаций различной интенсивности (с учетом геометрии рабочего органа), так и с наложением ультразвукового воздействия.

Основные теоретические положения

При получении полимерных композитных материалов, в особенности с использованием в качестве наполнителей-модификаторов наночастиц, обязательным условием для получения материалов с необходимыми свойствами является создание интенсивных энергетических полей, что, естественно, приводит к большим диссипативным выделениям в объеме перерабатываемого материала и, как следствие, вызывает значительный рост температуры. Если не иметь соответствующей математической модели, которая могла бы адекватно описать неизотермические процессы в рабочем объеме перерабатывающего оборудования, то могут возникать процессы термодеструкции, которые могут привести к снижению качества получаемого продукта.

В рамках данного направления разработана методика определения зависимостей для описания температурного поля в различных каналах перерабатывающего оборудования [31-35], которая базируется на интегральном преобразовании Лапласа [36]. При этом реализация данных моделей адаптировалась к математическому пакету Mathcad.

Что же касается настоящей роботы, то для расчета температурного поля в рабочем канале $T_{pk}(y,z)$, то есть в объеме перерабатываемой среды, получено такое уравнение для стационарных условий:

$$T_{pk}(y,z)=T_n+\frac{a}{\lambda_p}\cdot\left[\frac{\alpha_{oc}\cdot(T_{oc}-T_{vc})}{K_{oc}(y,z)^{-1}}+\frac{\alpha_{ok}\cdot(T_{ok}-T_{нk})}{K_{ok}(y,z)^{-1}}\right]+\frac{q_{dis}}{\lambda_p}\cdot a^2\cdot z, \quad (2)$$

где $T_{нk}$, T_{vc} – температура соответственно на наружной поверхности корпуса и внутренней поверхности сердечника; T_{ok}, T_{oc} – температура охлаждающей среды, соответст-

венно наружной поверхности корпуса и внутренней поверхности сердечника; T_n – начальная температуры перерабатываемого материала; α_{ok}, α_{oc} – коэффициенты теплоотдачи между охлаждающей средой и соответственно наружной поверхностью корпуса и внутренней поверхностью сердечника червяка; y, z – оси координат в предположении развертки винтового канала на плоскость (при этом ось y направлена вдоль глубины винтового канала, а ось z – вдоль длины винтового канала); a – параметр, характеризующий взаимозависимость теплофизических характеристик с геометрическими и скоростными параметрами проведения процесса экструзии; λ_p – коэффициент теплопроводности для расплава полимера (последнее выражение справедливо для зоны дозирования, где перерабатываемый материал находится в виде расплава); $K_{oc}(y,z)$, $K_{ok}(y,z)$ – комплексы, характеризующие соотношение геометрических параметров рабочего канала при выбранных граничных условиях; q_{dis} – функция диссипация, реализуемая в рабочем канале.

Для комплекса $K_{oc}(y,z)$ будет справедливым такое выражение:

$$K_{oc}(y,z)=\sum_{k=0}^{\infty}\left[2\cdot\sqrt{\frac{z}{\pi}}\cdot\exp\left(-\frac{b1_k{}^2}{4\cdot z}\right)-b1_k\cdot erfc\left(\frac{b1_k}{2\cdot\sqrt{z}}\right)\right]+$$

$$+\sum_{k=0}^{\infty}\left[2\cdot\sqrt{\frac{z}{\pi}}\cdot\exp\left(-\frac{b2_k{}^2}{4\cdot z}\right)-b2_k\cdot erfc\left(\frac{b2_k}{2\cdot\sqrt{z}}\right)\right], \qquad (3)$$

где $b1_k=\sqrt{1/a}\cdot\left[-(y-h/2)+h\cdot(2\cdot k+1)\right]$; $b2_k=\sqrt{1/a}\cdot\left[(y-h/2)+h\cdot(2\cdot k+1)\right]$; h – глубина винтового канала.

Выражение для $K_{ok}(y,z)$ имеет аналогичный вид, с соответствующей корректировкой величин $b1_k$ и $b2_k$ (следует заметить, что при получении уравнений (2) и (3), начало системы координат расположено посредине рабочего канала).

Функцию диссипации можно рассчитать из такой зависимости:

$$q_{dis}=\mu^{-1/n}\cdot\left[(\partial P/\partial x\cdot y+C_0)^2+(\partial P/\partial z\cdot y+C_1)^2\right]^{(n+1)/(2\cdot n)}, \qquad (4)$$

где μ – коэффициент консистенции в рабочем винтовом канале (в общем случае учитывается зависимость коэффициента консистенции от температуры по закону Аррениуса); $\partial P/\partial x$, $\partial P/\partial z$ – градиенты давления соответственно вдоль ширины винтового канала (вдоль оси x) и вдоль длины винтового канала (вдоль оси z); n – показатель степени для неньютоновской жидкости (в данном случае для расплава полипропилена); C_0, C_1 – постоянные интегрирования, которые в общем случае зависят от граничных условий, геометрических параметров и свойств полимерных материалов.

И, наконец, параметр a в усредненном виде может быть представлен так:

$$a=\sqrt{\frac{\lambda_p\cdot W_n\cdot h}{\rho_p\cdot C_p\cdot Q}}, \qquad (5)$$

где ρ_p, C_p – соответственно плотность и коэффициент теплоёмкости перерабатываемого материала; W_n – нормальная ширина винтового канала; Q – производительность экструдера.

Следует заметить, что по уравнению (2) на данном этапе не возможно выполнить расчеты, так как температуры $T_{нk}$, T_{vc} в случае конвективного теплообмена являются не определенными величинами. Чтобы их найти, следует также записать выражения для распределения температурного поля в корпусе $T_k(y)$ и червяке $T_c(y)$. При этом, если пренебрегать изменением температуры вдоль оси винтового канала, то эти выражения можно представить так:

$$T_k(y) = T_{vk} + \alpha_{ok} / \lambda_k \cdot (T_{ok} - T_{нk}) \cdot (y - h/2); \quad (6)$$

$$T_c(y) = T_{нc} + \alpha_{oc} / \lambda_c \cdot (T_{ok} - T_{vc}) \cdot (y + h/2), \quad (7)$$

где T_{vk}, $T_{нc}$ – температура соответственно на внутренней поверхности корпуса и наружной поверхности сердечника; λ_k, λ_c – коэффициенты теплопроводности соответственно материала корпуса и червяка.

Таким образом, для решения тепловой задачи в рабочем канале следует одновременно использовать уравнения (2), (6) и (7).

При моделировании тепловых процессов в зазорах барьерной части (зона 1 на рис. 5) можно воспользоваться таким уравнением (в данном случае распределение температур на границах можно получить из решения в винтовом канале):

$$T_b(y,\varsigma) = T1 + T2(y,\varsigma) + T3(y,\varsigma) - T4(y,\varsigma), \quad (8)$$

где $T1 = (T_{vk} - T_{bs})/2$; $T2(y,\varsigma) = (T_{vk} - T_{bs})/2 \cdot \left[\sum_{k=0}^{\infty} erfc\left(\alpha_k / \left(2 \cdot \sqrt{\varsigma}\right)\right) - \sum_{k=0}^{\infty} erfc\left(\beta_k / \left(2 \cdot \sqrt{\varsigma}\right)\right) \right]$;

$$T3(y,\varsigma) = 2 \cdot (T_{vk} + T_{bs} - 2 \cdot T_{nb}) / \pi \cdot \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k / (2 \cdot k - 1) \cdot \cos[K(y)] \cdot \exp[-K(\varsigma)];$$

$$T4(y,\varsigma) = q_{dis} \cdot 4 \cdot \delta_b^{\,2} / \left(\lambda_p \cdot \pi^3\right) \cdot \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k / (2 \cdot k - 1)^3 \cdot \cos[K(y)] \cdot [1 - \exp(-K(\varsigma)];$$

$$K(\varsigma) = a^2 \cdot \pi^2 / \delta_b^{\,2} \cdot (2 \cdot k - 1)^2 \cdot \varsigma;$$

$$K(y) = \pi \cdot y / \delta_b \cdot (2 \cdot k - 1);$$

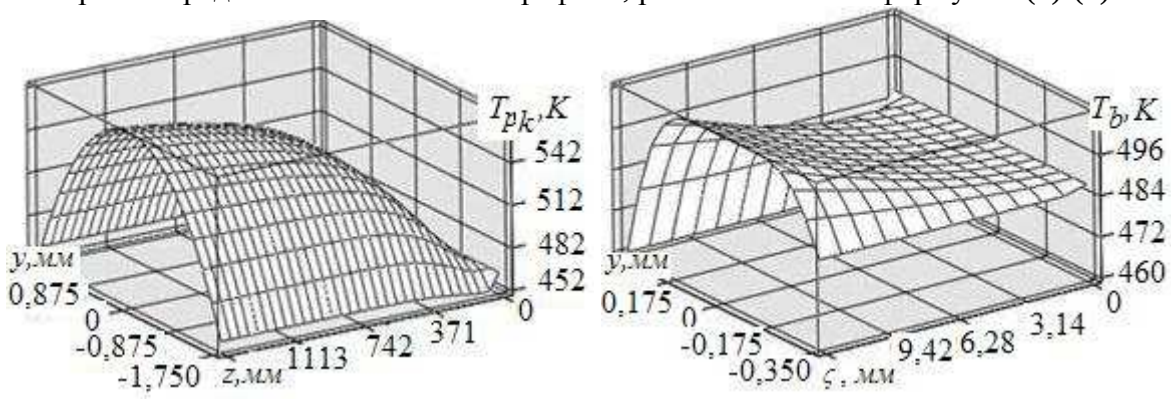
$$q_{dis} = \mu_b \cdot (\pi \cdot D \cdot N_0 / \delta_b)^{n+1};$$

$$\alpha_k = 1/a \cdot [-y + \delta_b / 2 \cdot (2 \cdot k + 1)];$$

$$\beta_k = 1/a \cdot [y + \delta_b / 2 \cdot (2 \cdot k + 1)].$$

Величины, входящие в последние выражения, имеют такой смысл: δ_b – высота радиального зазора в барьерной части; ς – координата, направленная перпендикулярна радиусу червяка; μ_b – коэффициент консистенции в радиальном зазоре барьерной части; N_0 – частота вращения червяка; D – диаметр червяка.

На рис. 7 представлены объемные графики, рассчитанные по формулам (2)-(8).



а) *б)*

Рис. 7. Объемные графики распределения температурного поля: а – в рабочем канале винтового канала; б – в рабочем зазоре барьерной части

Значения основных параметров, при которых получены графики на рис. 7, такие: $D = 45$ мм; $h = 3{,}5$ мм; $\alpha_{ok} = \alpha_{oc} = 3{,}8$ кВт/(м^2·К); $N_0 = 4{,}8$ с$^{-1}$; $Q = 3{,}12 \cdot 10^{-5}$ м^3/с; $\delta_b = 0{,}7$ мм. При этом средняя скорость сдвига, создаваемая в рабочем винтовом канале, составила $\dot{\gamma}_h = 300$ с$^{-1}$, а время пребывания – $t_h = 6{,}5$ с. В зазоре барьерной части скорость сдвига

достигла $\dot{\gamma}_b = 969\,\text{с}^{-1}$, а время пребывания – $t_b = 0{,}02\,\text{с}$, что является незначительным. Как следствие, процессы термодеструкции не достигают высоких уровней.

Выводы

1. Рассмотрены основные направления улучшения механических свойств полимерных композитов с использованием в качестве наполнителей-модификаторов волокнистых материалов и нанотрубок.

2. Выполнены экспериментальные исследования при оптимальных режимах переработки, что позволяет значительно повысить механические свойства, в частности предела прочности при растяжении полимерного композита.

3. Разработаны математические модели для оптимизации параметров при неизотермических режимах переработки композитных материалов.

Список использованных источников

1. Effect of glass fiber surface chemistry on the mechanical properties of glass fiber reinforced, rubber-toughened nylon 6 / D.M. Laura, H. Keskkula, J.W. Barlow, D.R. Paul // Polymer. – 2002. – Vol.43. – P.4673-4687.

2. Structure and Mechanical Behavior of Nylon 6 Fibers Filled with Organic and Mineral Nanoparticles. II. In Situ Study of Deformation Mechanisms / Ibanes C., David L., Seguela R. and others // Journal of Polymer Science: Part B: Polymer physics. – 2004. – Vol.42. – P.2633-2648.

3. Буря А. И. Влияние природы и содержания наполнителей на свойства композитов на основе фенилона / А. И. Буря, Е. Ф. Кудина, Н. С. Гаюн // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2010. – № 1. – С. 55-60.

4. Akkapeddi M.K. Glass Fiber Reinforced Polyamide-6 Nanocomposites // Polymer Composites. – 2000. – Vol.21, № 4. – C.576 – 585.

5. Ali R., Iannace S., Nicolais L. Effects of processing conditions on the impregnation of glass fiber mat in extrusion/calendering and film stacking operations // Composites Science and Technology. – 2003. – Vol.63. – P.2217-2222.

6. A review on polymer nanofibers by electrospinning and their applications in nanocomposites / Z.-M. Huanga, Y.-Z. Zhang, M. Kotaki, S. Ramakrishna // Composites Science and Technology. – 2003. – Vol.63. – P.2223–2253.

7. Selvakumar V., Palanikumar K., Palanivelu K. Studies on Mechanical Characterization of Polypropylene/Na+-MMT Nanocomposites // Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering. – 2010. – Vol.9, №. 8. – P.671-681.

8. Сытар В. И. Конструкционные материалы на основе графито-наполненного фенилона / В. И. Сытар, А. И. Буря // Придніпровський науковий вісник. – 1998. – № 78. – С. 5-31.

9. Оптимизация состава композиции по комплексу триботехнических характеристик / В. И. Сытар, И. М. Кузяев, А. И. Буря и др. // Трение и износ. – 2004. – Т. 25, № 2. – С. 219-222.

10. Математична модель оцінки взаємного впливу компонентів в системі фенілон-органосилоксан-графіт / В. І. Ситар, І. М. Кузяєв, Д. С. Данилін, О. С. Кабат // Труды 43 Междунар. семинара по моделированию и оптимизации композитов «Моделирование и оптимизация в материаловедении». – Одесса: Астропринт, 2004. – С. 76.

11. Kroto H. C60: Buckminsterfullerene / Kroto H., Heath J., O'Brien S. et all // Nature. – 1985. – Vol.318. – P.162 – 163.

12. Iijima S. Helical microtubules of graphitic carbon // Nature. – 1991. – Vol.354. – P.56-58.

13. Радушкевич Л. В. О структуре углерода, образующегося при термическом разложении окиси углерода на железном контакте / Л. В. Радушкевич, В. М. Лукьянович // ЖФХ. –1952. – Т. 26 (88). – С. 86-88.

14. Thermal and flammability properties of polypropylene / carbon nanotube nanocomposites / Kashiwagi T., Grulke E., Hilding J. and all // Polymer. – 2004. – Vol.45. – P.4227-4239.

15. Раков Э. Г. Нанотрубки и фуллерены / Э. Г. Раков. – М.: Логос, 2006. – 376 с.

16. Уильямс Л. Нанотехнологии без тайн. Путеводитель / Л. Уильямс, У. Адамс; пер. с англ. Ю. Г. Гордиенко. – М.: ЭКСМО, 2010. – 368 с.

17. Гусев А. И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / А. И. Гусев. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 416 с.

18. Ибрагимов И. М. Основы компьютерного моделирования наносиситем: учебное пособие / И. М. Ибрагимов, А. Н. Ковшов, Ю. Ф. Назаров. – СПб.: Лань, 2010. – 384 с.

19. Дьячков П. Н. Углеродные нанотрубки: строение, свойства, применения / П. Н. Дьячков. – М.: Бином, 2006. — 293 с.

20. Елецкий А. В. Углеродные нанотрубки / А. В. Елецкий // Успехи физических наук. – 1997. – Т. 167, № 9. – С. 945-972.

21. Bauhofer W., Kovacs J.Z. A review and analysis of electrical percolation in carbon nanotube polymer composites // Composites Science and Technology. – 2009. – Vol. 69, №10. – P.1486-1498.

22. Masarapu C., Henry L.L., Wei Bingging. Specific heat of aligned multiwalled carbon nanotubes // Nanotechnology. – 2005. – Vol.16, №9. – P.1490-1494.

23. Fan Z., Advani S.G. Characterization of orientation state of carbon nanotubes in shear flow // Polymer. – 2005. – Vol.46. – P. 5232-5240.

24. Литвиненко В. Ф. Термодинамічні властивості вуглецевих нанотрубок / В. Ф. Литвиненко // Наноструктурное материаловедение. – 2008. – № 1. – С. 33-41.

25. Hamaker H.C. London – van der Waals attraction between spherical particles // Physica. – 1937. – Vol.4. – P.1058-1072.

26. Кузяев И. М. Анализ энергии взаимодействия между мелкодисперсными частицами наполнителей, используемых при получении полимерных композитов / И. М. Кузяев // Вопросы химии и химической технологии. – 2005. – № 4. – С. 96-109.

27. Кузяев И. М. Моделирование поведения агрегатов из нанодисперсных частиц в полимерной среде под действием периодически изменяющегося силового поля / И. М. Кузяев // Вопросы химии и химической технологии. – 2005. – № 5. – С. 139-145.

28. Кузяев И. М. Современные тенденции в совершенствовании технологий для получения нанокомпозитов на базе полимерных матриц / Кузяев И. М., Буря А. И., Рассоха Л. В. // Вісник СНУ ім. В. Даля. – 2011. – № 12(166), ч. 1. – С. 107-117.

29. Кузяев И. М. Обоснование и построение базовой теории для разделения наноагрегатов при получении полимерных нанокомпозитов / Кузяев И. М. // Вопросы химии и хим. технологии – 2008. – № 5. – С. 157-167.

30. Кузяєв І. М. Тепломасообмінні процеси і розробка обладнання високошвидкісної екструзії полімерів: автореф. дис…. докт. техн. наук: 05.17.08 / Кузяєв І. М.; Харків. нац. техн. ун-т «Харківський політехнічний університет». – Харків, 2009. – 39 с.

31. Кузяєв І. М. Моделювання неізотермічних процесів у робочому об’ємі черв’ячних насосів для аномально в’язких рідин / Кузяєв І. М. // Вопросы химии и хим. технологии. – 2002. – № 2. – С. 107-112.

32. Кузяев И. М. Разработка программного пакета в системе Mathcad для оптимизационного проектирования и моделирования работы экструзионных агрегатов / Кузяев И. М. // Plastics Processing Technology Summit, 2004. – Xi’an: China. – 2004. – P. 68-78.

33. Кузяев И. М. Интенсификация процессов тепломассопереноса в рабочем канале червячных машин при переработке неньютоновских полимерных жидкостей / Кузяев И. М. // Промышленная теплотехника. – 2004. – Т. 26, № 1. – С. 25-31.

34. Кузяев И. М. Математическое моделирование процессов в зоне дозирования одночервячных машин / Кузяев И. М. // Вопросы химии и хим. технологии. – 2007. – № 3. – С. 151-172.

35. Кузяєв І. М. Моделювання роботи та проектування екструзійних агрегатів з розробкою елементів САПР / Кузяєв І. М. – Дніпропетровськ: ДВНЗ УДХТУ, 2008. – 474 с.

36. Лаврентьев М. А. Методы теории функций комплексного переменного / Лаврентьев М. А., Шабат Б. В. – М.: Наука, 1973. – 736 с.

УДК 678.027.3

О. О. Акимов, канд. техн. наук
Чернігівський державний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

Г. М. Коваленко, канд. техн. наук
К. Г. Коваленко, інженер
Науково-виробничий центр «Антарес ЛТД», м. Чернігів, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ФОРМУВАННЯ ПОГОНАЖНИХ ВИРОБІВ З ЖОРСТКОГО ПВХ НА ЕКСТРУЗІЙНІЙ ЛІНІЇ ЛП-45

Приведені результати дослідження процесу формування погонажних виробів різних профілів з жорсткого ПВХ на екструзійній лінії ЛП-45. Наведені рекомендації по вибору оптимальних технологічних параметрів формування виробів та формувального інструменту.

Вступ

Методом екструзії в промисловості переробки полімерів виготовляють найрізноманітніші вироби, такі як труби, листи, плівки, профільні смуги, кабельні оболонки і багато інших. Основним обладнанням для переробки полімерів методом екструзії є одно- і багаточерв'ячні екструдери. Формування виробів з жорсткого полімеру ПВХ має свої особливості, які залежать від властивостей полімеру і геометрії інструменту.

Мета роботи

Отримання залежностей параметрів формування полімеру від геометрії внутрішньої поверхні інструменту і технологічних параметрів.

Аналіз публікацій

У літературі приводяться конструктивні параметри черв'яків і значення середніх градієтів швидкості, рекомендованих для переробки полімерів [1, 2]. Аналіз публікацій показав, що залежно від рецептури композицій ПВХ і режимів їх формування експлуатаційні і технологічні параметри процесу можуть значно відрізнятися від рекомендованих, що може привести до зниження продуктивності майже вдвічі.

Методи та результати

Дослідження проводилися на лінії екструзійного типу з екструдером діаметром 45 мм і співвідношенням довжини черв'яка до його діаметру 25:1.

Наведені результати дослідження формування композиції ПВХ виробництва Німеччини марки SORVIL. Слід зазначити, що аналогічні дослідження, проведені на інших марках, підтвердили одержані закономірності.

Для дослідження процесу екструзії при формуванні з ПВХ погонажних виробів кутових профілів вибрані та розглянуті кутки типорозміру 50х50 мм.

Для створення моделі та дослідження процесу екструзії у профілюючому інструменті розділимо простір усередині профілюючого інструменту для кутка на 3 частини, дві з яких мають прямокутну ділянку щілинного типу та одну конусну ділянку щілинного типу (рис.1). В якості базової моделі для розрахунку вибираємо метод, викладений у [1].

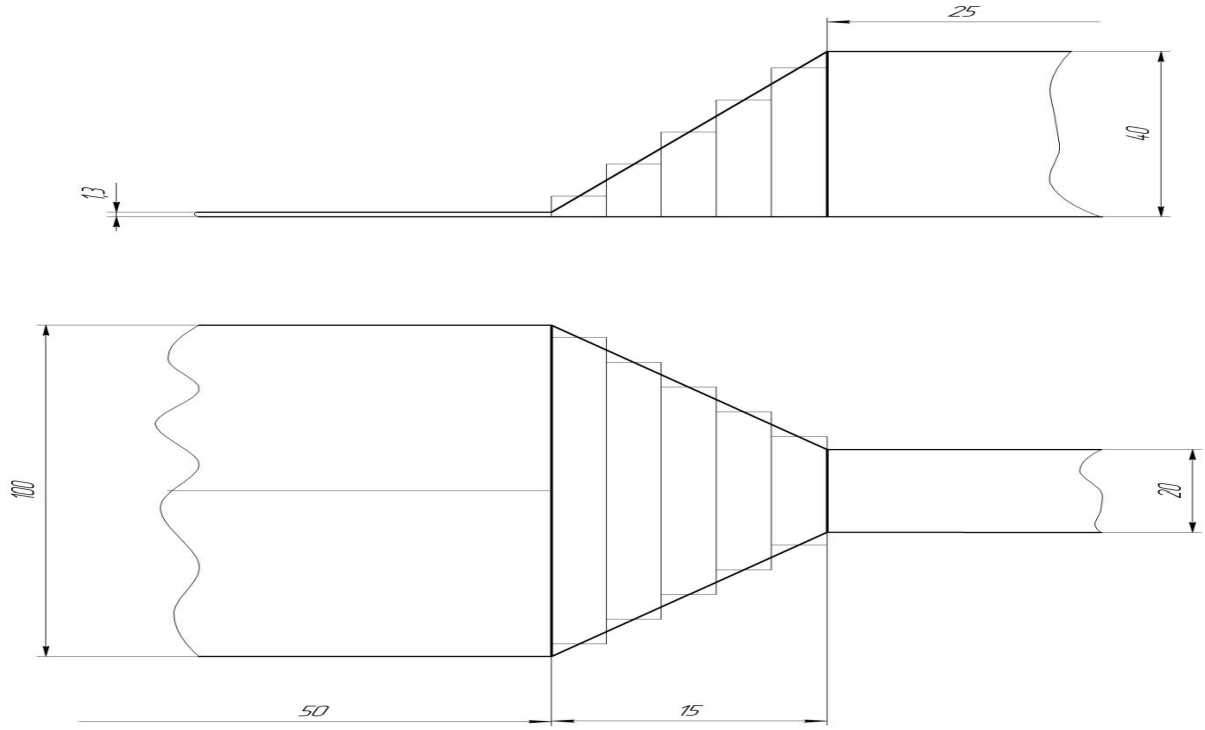


Рис. 1. Профіль простору всередині профілюючого інструменту для кутка 50х50 мм

Продуктивність формуючого інструменту:

$$Q = k_г'(P/\mu_0)^n, \quad (1)$$

де і $k_г'$ – коефіцієнт опору для течії псевдопластичної рідини;

P – тиск в інструменті;

μ_0– в'язкість.

Розрахувавши значення ефективної в'язкості і коефіцієнта опору для кожного елемента каналу, можна визначити сумарний коефіцієнт опору за формулою:

$$k_{г\varepsilon} = \left[\sum_{i=1}^{m}\left(\frac{\eta_i}{\eta_1}\frac{1}{k_i}\right)\right]^{-1}. \quad (2)$$

Тиск в інструменті визначається з виразу:

$$P_г = Q\eta_1/k_{г\varepsilon}, \quad (3)$$

де η_1 — ефективна в'язкість у каналі профілюючої матриці.

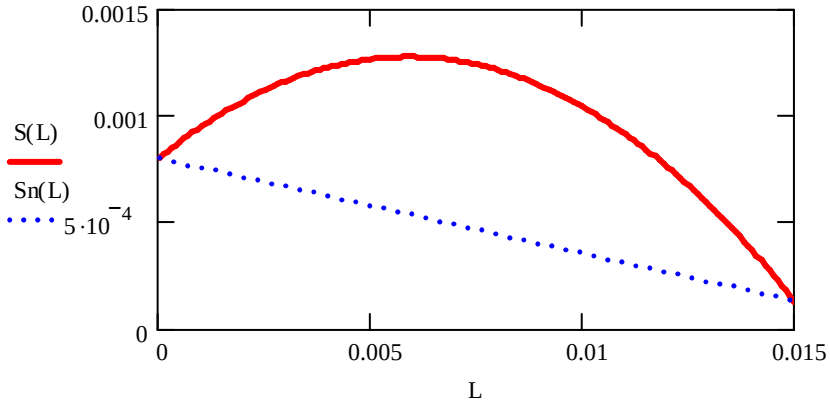
Швидкість полімеру U на осі каналу визначимо з виразу:

$$U = \frac{h^{n+1}}{\mu_0^n(n+1)} \cdot \left(\frac{dP}{dx}\right)^n. \quad (4)$$

Проаналізувавши внутрішній профіль інструменту на конусній ділянці, одержано графік зміни площі поперечного перерізу конусної ділянки всередині профілюючого інструменту залежно від висоти, ширини та довжини ділянки, який був проведений на основі залежності:

$$S(L) := h(L) \cdot w(L). \quad (5)$$

Графічно зміну площі поперечного перерізу конусної ділянки від зміни висоти та ширини даної ділянки представлено у вигляді графіка, представленому на рис. 2.

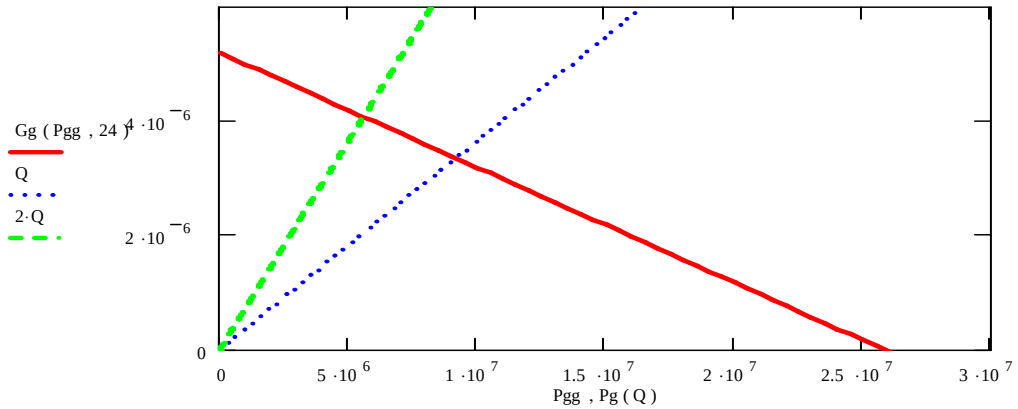


S(L) – площа поперечного перерізу конусної ділянки існуючого інструменту;
Sn(L) – площа поперечного перерізу конусної ділянки модернізованого інструменту

Рис. 2. Залежність площі поперечного перерізу нового та вихідного виконання конусної ділянки формуючого інструменту від її довжини (L,м)

З приведеного рисунка видно, що зміна площі поперечного перетину конусної ділянки має криволінійний характер. Це свідчить про те, що на цій ділянці буде спостерігатись перепад швидкості течії полімеру та перепад тиску, що негативно відобразиться на продуктивності лінії. Для дослідження запропонований також новий інструмент з профілем, площа поперечного перерізу змінюється за лінійним законом, наведеному на рисунку 2 (пунктирна лінія).

Визначивши характеристику інструменту, аналогічно [2] знайдемо робочу точку екструдера, яка визначена при номінальних робочих оборотах черв'яка 24 об/хв, при формуванні кутка 50х50 мм (рисунок 3).

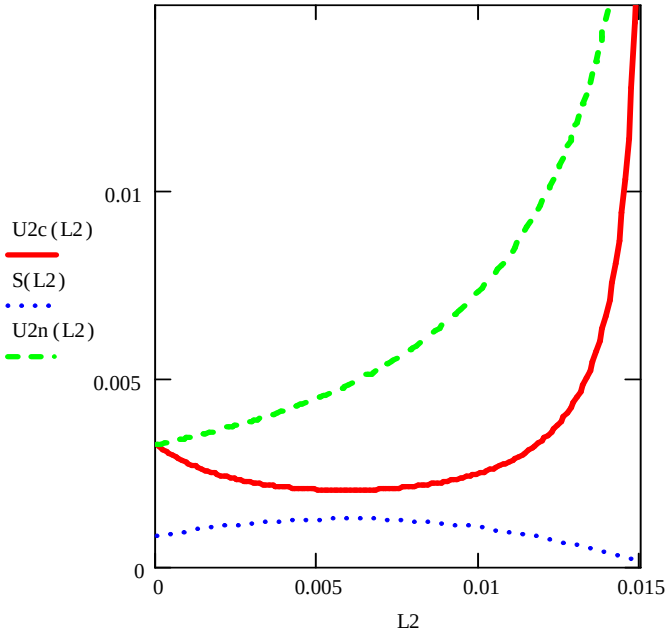


Суцільна лінія – характеристика екструдера; пунктирна лінія – характеристика головки з одним потоком; штрихова лінія – характеристика головки з двома потоками

Рис. 3. Робоча характеристика екструдера

З рисунка можна зробити висновок про те, що продуктивність лінії в цілому залежить від опору у формуючому інструменті. При формуванні профілю в два потоки продуктивність лінії зросте на 10 %.

Швидкості витоку полімеру з формуючого інструменту вихідного та нового виконання, наведені на рисунку 4.

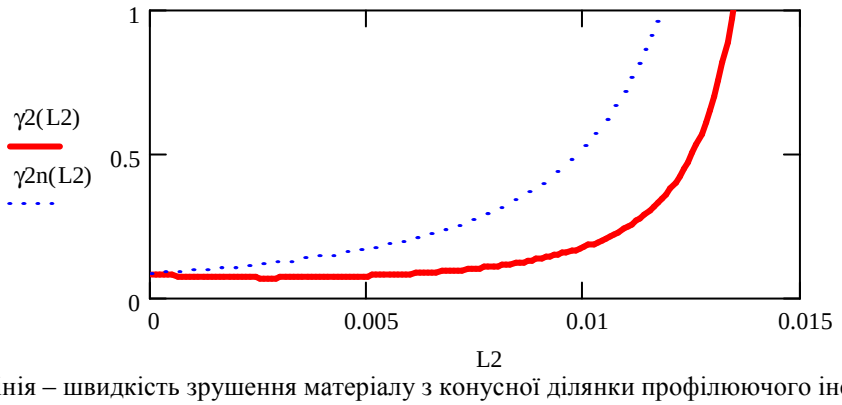


Суцільна лінія – швидкість витоку матеріалу з конусної ділянки існуючого інструменту;
штрихова лінія – швидкість витоку матеріалу з конусної ділянки профілюючого інструменту нового виконання

Рис. 4. Залежність швидкості витоку полімеру з конусної ділянки профілюючого інструменту вихідного та нового виконання конусної ділянки від її довжини

З приведеного вище рисунка видно, що швидкість витоку матеріалу з конусної ділянки каналу нового виконання має більш плавний рівномірний характер, ніж швидкість витоку матеріалу з конусної ділянки каналу вихідного виконання, що свідчить про ускладненість руху полімеру в цьому каналі.

Важливою характеристикою течії полімеру в каналі є швидкість його зрушення. Швидкості зрушення матеріалу в конусній ділянці профілюючого інструменту вихідного та нового виконання наведені на рисунку 5.



Суцільна лінія – швидкість зрушення матеріалу з конусної ділянки профілюючого інструменту;
пунктирна лінія – швидкість зрушення матеріалу з конусної ділянки профілюючого інструменту нового виконання

Рис. 5. Залежність швидкості зрушення матеріалу в конусній ділянці профілюючого інструменту вихідного та нового виконання від довжини конусної ділянки

З рисунку 5 видно, що в новому інструменті деформація полімеру відбувається більш рівномірно, що позитивно вплине на умови формування та охолодження профілю.

Висновки

Отримана модель течії жорсткого полімеру через формуючий інструмент. Отримані залежності параметрів формування полімеру (тиску, швидкості витікання полімеру, ко-

ефіцієнта опору) від геометрії внутрішньої поверхні інструменту і продуктивності. Визначена робоча характеристика екструдера.

Запропонований новий профіль конусної частини інструменту, яка значно зменшує перепади параметрів формування на виході із фільєри.

Список використаних джерел

1. Торнер Р. В. Теоретические основы переработки полимеров / Р. В. Торнер. – М.: Химия, 1977. – 462 с.

2. Шенкель Г. П. Шнековые прессы для пластмасс / Г. П. Шенкель. – Л.: Государственное научно-техническое издательство химической литературы, 1962. – 358 с.

УДК 539.3:534.1

О.В. Савченко, канд. техн. наук
Чернігівський державний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

ОПТИМАЛЬНЕ ПРОЕКТУВАННЯ ОБОЛОНОК ДЛЯ РОБОТИ У ЗАДАНОМУ ЧАСТОТНОМУ ДІАПАЗОНІ

Пропонується метод мінімізації амплітуд резонансних коливань композитних конструкцій у заданому частотному діапазоні. Наведено приклад оптимального проектування багатошарових пологих оболонок, працюючих у вибраному діапазоні частот.

Вступ

Характерним для більшості робіт, присвячених проблемі демпфірування коливань у конструкціях, є аналіз одночастотних режимів коливань. Відповідно і пошук оптимальних проектів конструкцій з високим демпфіруванням проводився для одночастотних коливань. В основному, це пов’язано з тим, що основну небезпеку становлять саме одночастотні режими при резонансних коливаннях, для характеристики яких можна застосувати такий параметр, як декремент коливань. Разом із тим очевидно, що проекти, оптимальні для однієї форми коливань, можуть не бути оптимальними для іншої форми, тобто, зменшуючи амплітуду коливань на одній частоті, можна збільшити амплітуду на іншій частоті.

У зв’язку з цим актуальною є розробка методики демпфірування коливань у заданому частотному діапазоні. Така необхідність виникає при багаточастотному і випадковому характері зовнішніх збуджень, тобто при дії збуджень з широким спектром частот. Очевидно, при цьому існує вірогідність потрапляння конструкції у резонансний режим на різних частотах.

Таким чином, задача мінімізації амплітуд коливань у заданому частотному діапазоні виникає при дії навантажень із широким спектром частот, зокрема полігармонічних, імпульсних і випадкових навантажень [1].

Метод, який пропонується у цій роботі, узагальнює запропоновані у наших роботах [1; 2] методи оптимального проектування композитних конструкцій з високими демпфіруючими властивостями на випадок дії навантажень із широким спектром частот.

Математична модель оболонки і побудова цільової функції для параметричної оптимізації

Розглядається багатошарова полога оболонка з шарами в’язкопружного матеріалу, армованого волокнами теж в’язкопружного матеріалу з іншими механічними характеристиками. Для побудови математичної моделі оболонки використовується напіваналітичний метод скінченних елементів у варіанті методу переміщень, згідно з яким на першому етапі розглядається моношар оболонки, після чого проводиться синтез багатошарової оболонки відповідно до умов з’єднання шарів.

Для побудови скінченно-елементної моделі моношару використовується апроксимація переміщень по товщині у вигляді поліномів Лагранжа, а у двох інших напрямках (осі x, y) – у вигляді ортогональних рядів Фур’є.

Для врахування в'язкопружних властивостей матеріалів використовується перехід до простору інтегральних перетворень Фур'є.

Відповідне розрахункове рівняння динаміки оболонки у частотному просторі одержано у вигляді:

$$Z(i\omega)\,q = F(i\omega), \qquad (1)$$

де $Z(i\omega) = K(i\omega) + (i\omega)^2 M$ – матриця динамічної жорсткості; $F(i\omega)$ – інтегральне перетворення Фур'є зовнішнього навантаження; q – переміщення узагальнених координат конструкції; $K(i\omega)$ – матриця жорсткості шару, яка залежить від комплексних модулів матеріалів і структури армованого матеріалу; M – матриця мас; ω – частота коливань; $i \equiv \sqrt{-1}$.

Рівняння (1) можна використати для аналізу вимушених коливань, для чого необхідно одержати розв'язок

$$q = Z(i\omega)^{-1} \cdot F(i\omega), \qquad (2)$$

а також аналізу вільних коливань (форм, частот, декрементів коливань) шляхом розв'язання рівняння

$$\left|Z(i\omega)\right| = 0. \qquad (3)$$

Ефективність використання частотного методу скінченних елементів для розв'язання задач динаміки показано у [1; 2].

У цій роботі рівняння (1) використовується для побудови амплітудно-частотного спектра коливань оболонки.

Для одержання спектральних характеристик, які визначають переміщення вузлів конструкції (компонент вектора q), знайдемо розв'язки для вектора q у заданому частотному діапазоні при навантаженні на задану координату у вигляді δ-імпульсу (у просторі перетворень Фур'є δ-функція буде одиницею):

$$Q = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & \cdots & q_{1N} \\ q_{21} & q_{22} & \cdots & q_{2N} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ q_{i1} & q_{i2} & \cdots & q_{iN} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ q_{n1} & q_{n2} & \cdots & q_{nN} \end{bmatrix}.$$

В одержаній таким чином матриці переміщень кожний рядок дає залежність переміщення по i-й координаті від частоти. Відповідна амплітудно-частотна характеристика визначається як залежність абсолютних значень комплексних амплітуд від частоти.

Задача мінімізації амплітуд коливань i-ї узагальненої координати у заданому частотному діапазоні формулюється так:

$$\text{Мінімізувати } \max\left(\left|q_{i,k}\right|\right), \quad \left(k = 1, 2, \ldots, N\right)$$

$$\text{при обмеженнях } x_{\min} \le x \le x_{\max}, \quad G\left(x\right) \le 0,$$

де $\left|q_{i,k}\right|$ – амплітуди коливань i-го узагальненого переміщення (елемент i-го рядка матриці Q); x – вектор проектних змінних; $G\left(x\right)$ – функція неявних обмежень; $x_{\min}, x_{\max}$ – граничні значення параметрів проекту.

Перевагами такої постановки задачі оптимізації є можливість забезпечення необхідного демпфірування у заданому частотному діапазоні, достатньо простий спосіб об-

числення критерію оптимізації, який полягає у визначенні максимальної компоненти відповідного рядка матриці Q, можливість контролю амплітуд коливань у напрямку всіх узагальнених переміщень. В останньому випадку критерієм оптимізації буде максимальне значення компонент матриці Q.

Метод оптимізації

При проектуванні конструкції для роботи в умовах динамічних навантажень постає задача вибору конструктивних параметрів, які забезпечують необхідні експлуатаційні характеристики. Для розв'язання цієї задачі у більшості випадків використовують алгоритми теорії нелінійного програмування (ТНП). З ускладненням конструкцій і появою нових матеріалів класичні алгоритми ТНП виявилися неефективними у зв'язку з суттєвим збільшенням кількості проектних параметрів, ускладненням обмежень і критеріїв оптимізації, які у більшості випадків визначаються програмними засобами. Суттєвим недоліком класичних градієнтних алгоритмів ТНП є складність визначення похідних цільових функцій і обмежень, а також принципова налаштованість на визначення тільки локальних екстремумів. Саме ці особливості заважали і продовжують заважати широкому впровадженню класичних алгоритмів ТНП у практику проектування оптимальних конструкцій.

У зв'язку з цим останніми роками активно розвиваються пошукові методи, які використовують принципи біології і генетики. У першу чергу, це генетичні алгоритми [3], основна ідея яких полягає у створенні популяції індивідів, кожен з яких має вигляд хромосоми, що складається з генів, які представляють набір спадкових ознак – проектних параметрів. Кращий з індивідів вибирається у процесі еволюційного пошуку відповідно до прийнятої функції пристосованості. Процес еволюційного пошуку реалізується з використанням операторів, аналогічних біологічним процесам схрещування, мутації, інверсії. Популяція оновлюється з кожним поколінням за рахунок генерації нових індивідів і видалення старих, у результаті кожна нова популяція виявляється кращою з точки зору відповідності вимогам функції пристосованості (цільової функції).

У процесі розвитку генетичних (еволюційних) алгоритмів з'явилися обґрунтування доцільності використання двійкового алфавіту для кодування хромосоми і відповідні численні реалізації методу, які використовували попереднє кодування і двійкові хромосоми [3]. Однак, як виявилося, двійкове кодування має суттєві недоліки при пошуку у неперервних просторах із необхідною точністю, що характерно саме для задач оптимізації конструкцій. У зв'язку з цим для оптимізації у неперервних просторах останнім часом використовуються алгоритми, побудовані на використанні хромосом у вигляді набору дійсних чисел. Такі алгоритми одержали назву неперервних генетичних алгоритмів RGA (real-coded GA) на відміну від двійкових BGA (binary-coded GA) [4].

У цій роботі використовується алгоритм RGA, особливості якого описуються в [5]. Блок-схеми алгоритмів для оптимізації з обмеженнями на параметри оптимізації і з обмеженнями на змінні стану наведено на рис. 1, 2.

Приклади розрахунку оптимальних параметрів багатошарової оболонки

Розглядається оболонка з 15-ма шарами армованих матеріалів з такими параметрами:

– габаритні розміри оболонки 4×4 *м*;

– кривизни $k1 = 0.001$ 1/*м*, $k2 = 0.001$ 1/*м*;

– комплексні модулі армуючого матеріалу: об'ємний модуль $K_1 = 4\cdot10^{11} + 4\cdot10^{8} i$ *Па*, модуль зсуву $G_1 = 0,8\cdot10^{11} + 0,8\cdot10^{8} i$ *Па*;

– комплексні модулі матеріалу основи відповідно $K_2 = 4\cdot10^{9} + 4\cdot10^{8} i$ *Па*, $G_2 = 0,8\cdot10^{9} + 0,8\cdot10^{8} i$ *Па*;

– густина армуючого матеріалу $\rho_1 = 2,8 \cdot 10^3 \ \ кг/м^3$;

– густина матеріалу основи $\rho_2 = 1,2 \cdot 10^3 \ \ кг/м^3$.

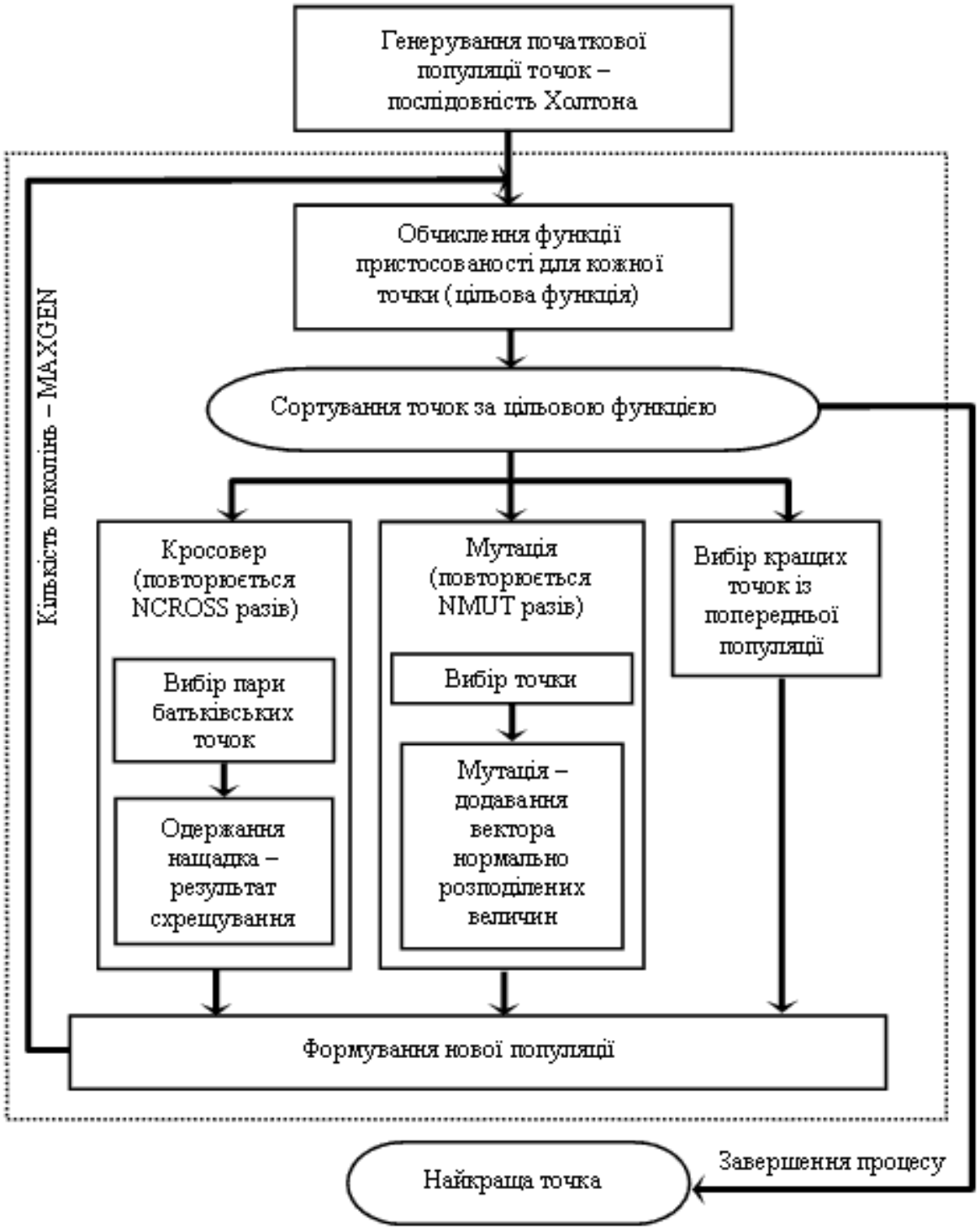


Рис. 1. Алгоритм оптимізації з обмеженнями на параметри проектування

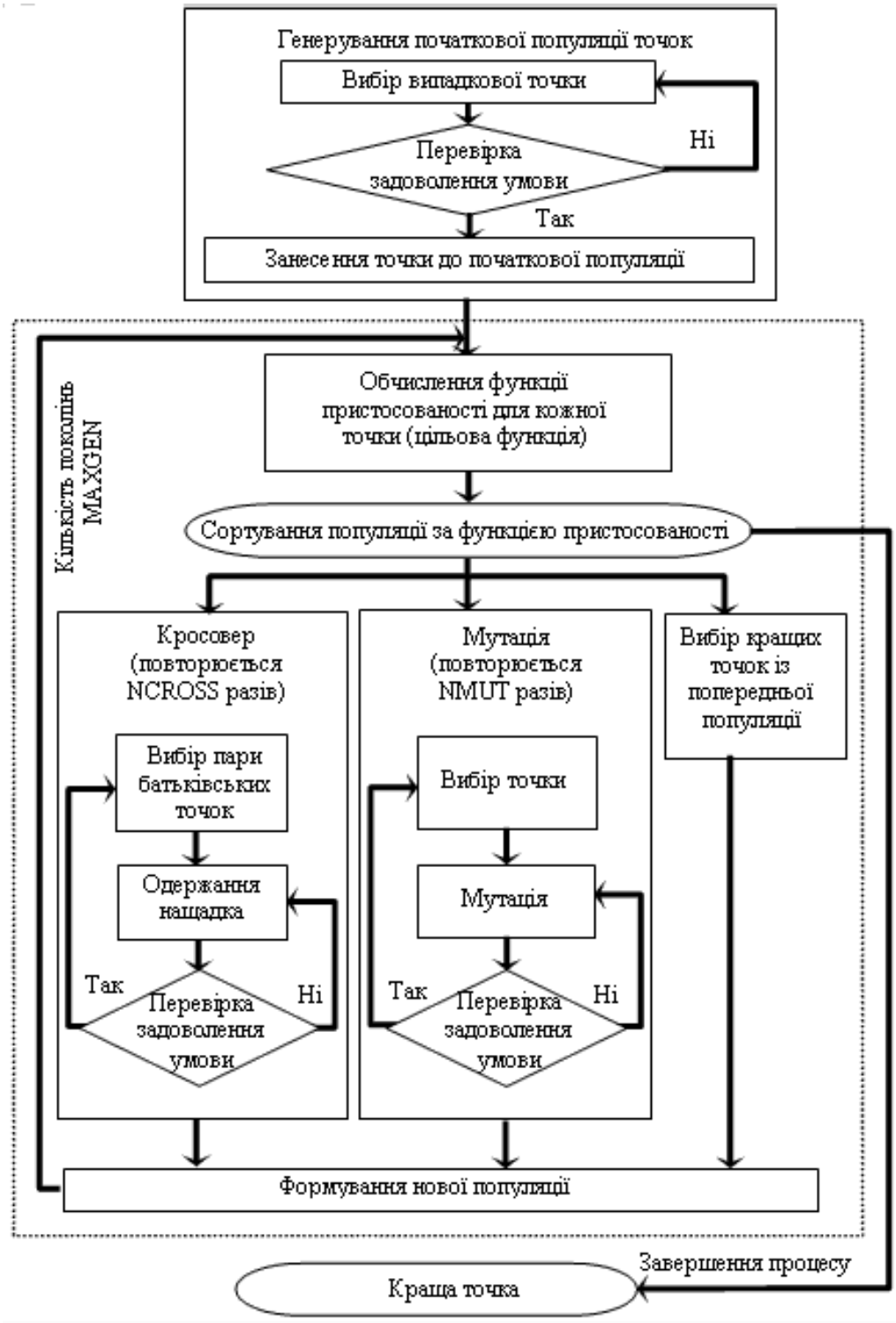


Рис. 2. Алгоритм оптимізації з обмеженнями на параметри проектування і змінні стану

1. Оптимальний проект оболонки з обмеженнями на величини проектних параметрів.

Цільовою функцією є амплітуда коливань характерних точок оболонки у частотному діапазоні, який включає чотири перші форми коливань.

Звернення до програми оптимізації у системі Matlab має такий вигляд:

lb=[0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.0005 0.0005 0.0005 0.0005 0.0005 0.0005 0.0005 0.0005 0.0005 0.0005 0.0005 0.0005 0.0005 0.0005 0.0005];

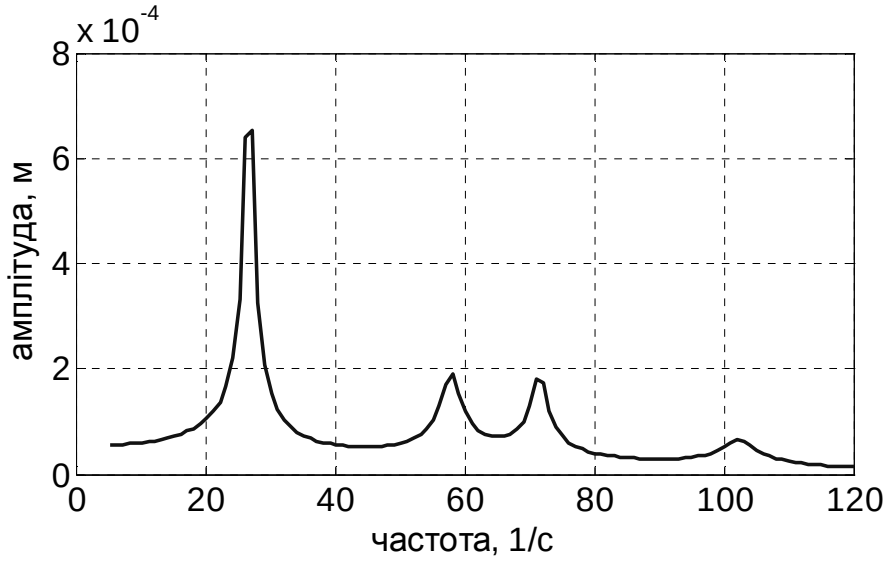
ub=[0.9 0.9 0.9 0.9 0.9 0.9 0.9 0.9 0.9 0.9 0.9 0.9 0.9 0.9 0.9 pi/2 pi/2 pi/2 pi/2 pi/2 pi/2 pi/2 pi/2 pi/2 pi/2 pi/2 pi/2 pi/2 pi/2 pi/2 pi/2 0.001 0.001 0.001 0.001 0.001 0.001 0.001 0.001 0.001 0.001 0.001 0.001 0.001 0.001 0.001];

genetic5(@AmplOptShell15_2forms, lb, ub),

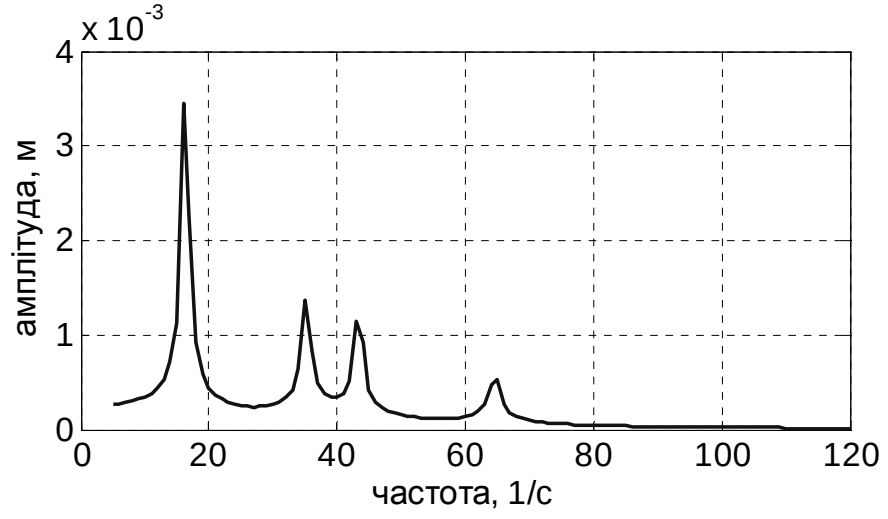
де $lb = [\eta_{1\min}, ..., \eta_{15\min}, \varphi_{1\min}, ..., \varphi_{15\min}, h_{1\min}, ..., h_{15\min}]$,

$ub = [\eta_{1\max}, ..., \eta_{15\max}, \varphi_{1\max}, ..., \varphi_{15\max}, h_{1\max}, ..., h_{15\max}]$ – обмеження проектних параметрів, η_i – коефіцієнт армування, φ_i – кут армування, h_i – товщина шару, genetic5 – програма оптимізації, AmplOptShell15_2forms – програма обчислення цільової функції.

Графіки амплітудно-частотних характеристик оболонки з оптимальними і довільними значеннями проектних параметрів наведено на рис. 3, *а*, *б*.



а



б

Рис. 3. Амплітудно-частотні характеристики для оболонки з оптимальними (а) і довільними (б) проектними параметрами

Як видно з порівняння рисунків, для оптимального проекту амплітуда коливань на першій частоті у 5 разів менша, ніж для довільного варіанта оболонки. Для оболонок з параметрами проекту, що дорівнюють граничним значенням ($x = lb$ і $x = ub$), амплітуда коливань на нижній частоті перевищує оптимальну більше ніж у 20 разів.

2. Оптимальний проект оболонки з обмеженнями на проектні параметри і змінні стану.

Визначаються параметри оболонки з обмеженнями на масу $m \le 20$ *кг/м*^{2}, які забезпечують мінімальне значення максимальної амплітуди коливань оболонки у діапазоні частот 10-120 *рад/с*, який охоплює перші чотири форми коливань.

Для даної задачі використовується генетичний метод з обмеженнями на змінні стану (рис. 2). Звернення до програми оптимізації у системі Matlab при тих же обмеженнях на проектні параметри, що і в попередній задачі, має вигляд:

genetic_cond(@AmplOptShell15_2forms,{@DekrOptShell15_2_condmas}, lb, ub).

Оптимальну амплітудно-частотну характеристику наведено на рис. 4.

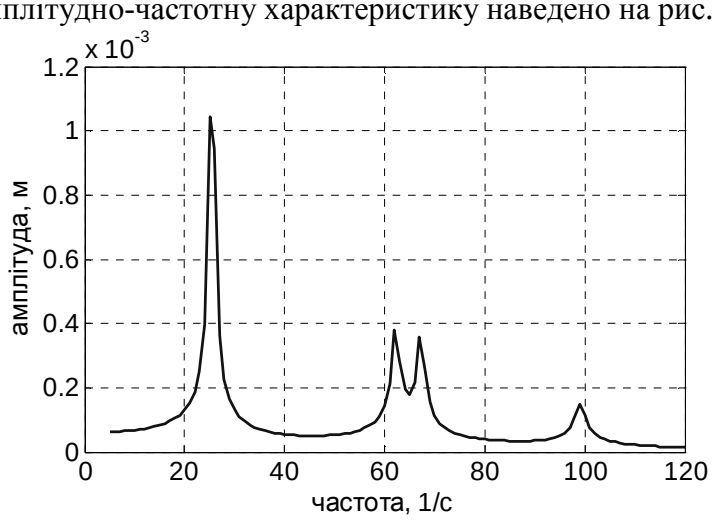


Рис. 4. Амплітудно-частотна характеристика при обмеженнях на масу

Як видно, з урахуванням обмежень на масу максимальна амплітуда трохи більша, ніж для оболонки без обмежень, але набагато менша, ніж для оболонок з початковими параметрами ($x = lb$ і $x = ub$).

Висновки

За допомогою запропонованої методики оптимізації за критерієм мінімальної амплітуди коливань можна визначити оптимальні параметри композитних конструкцій з урахуванням в'язкопружних властивостей матеріалів і суттєво зменшити амплітуди резонансних коливань. Метод оптимізації у заданому частотному діапазоні дозволяє одержати оптимальні параметри конструкції без використання такої характеристики демпфірування, як декремент коливань, який пов'язаний з конкретною формою коливань, що у деяких випадках вважається за краще.

Список використаних джерел

1. Савченко Е. В. Пассивное демпфирование колебаний композитных конструкций: монография / Е. В. Савченко. – Нежин: Аспект-Поліграф, 2006. – 232 с.

2. Дубенец В. Г. Колебания демпфированных композитных конструкций / В. Г. Дубенец, В. В. Хильчевский. – Київ: Вища школа, 1995. – Т. 1. – 226 с.

3. Гладков Л. А. Генетические алгоритмы / Л. А. Гладков, В. В. Курейчик, В. М. Курейчик; под ред. В. М. Курейчика. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 320 с.

4. Liu G P, Yang J B, Whidborne J.F. Multiobjektive Optimization and Control / Research Studies Press LTD. – 2003. – 320 p.

5. Савченко О. В. Метод пошуку глобального екстремуму в задачах оптимізації конструкцій з композиційних матеріалів / О. В. Савченко, І. О. Савченко // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. – Чернігів: ЧДТУ, 2008. – № 36. – С. 72-81.

УДК 534.1:539.3

В.Г. Дубенець, д-р техн. наук
О.О. Горбатко, канд. техн. наук
О.Л. Деркач, студент
Чернігівський державний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

ЧИСЕЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАНОКОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ

Побудовано математичні моделі і визначено ефективні характеристики нанокомпозитних матеріалів складної внутрішньої структури за допомогою енергетичного методу.

Постановка проблеми

Нанокомпозити є неоднорідними структурами, побудованими за методами нанотехнологій. Термін «нанотехнології» було введено у 1974 році японським ученим Норіо Танігуті для опису процесу побудови об'єктів за допомогою маніпуляцій окремими атомами. Успіхи у фізиці та хімії, стрімкий розвиток експериментальних методів досліджень і поява потужної обчислювальної техніки перевели нанотехнології із футурологічної у природничу галузь знань. Наукові проблеми в галузі наноматеріалів є найактуальнішими та відносяться до міждисциплінарних, оскільки знаходяться на перетині сучасних знань з матеріалознавства, фізики та хімії [1].

Уже сьогодні нанотехнології та наноматеріали відіграють важливу роль у багатьох галузях виробництва [2] і є найбільш активною й інтенсивною сферою досліджень з початку цього сторіччя. До наноструктурних матеріалів відносять нанопорошки металів, сплавів, інтерметалідів, оксидів, карбідів, нітридів, боридів, а також нанополімери, вуглецеві наноструктури, нанопористі матеріали, нанокомпозити [3]. Найбільш поширені наноматеріали двох класів: конструкційні і функціональні. Для одержання наноматеріалів використовують чотири методи: порошкова металургія, кристалізація з аморфного стану, інтенсивна пластична деформація та різноманітні методи нанесення наностуктурних покриттів з метою зміцнення поверхневого шару. Дослідження конструкційних наноматеріалів, придатних для широкого практичного використання в галузі машинобудування, знаходяться на початковій стадії розвитку і потребують використання різноманітних нанотехнологій [4].

Розробка конструкцій із нанокомпозитів можлива тільки при застосуванні наномеханіки, що є наступним історичним кроком розвитку структурної механіки матеріалів після макромеханіки, мезомеханіки і мікромеханіки. Для реальних експериментів на наноструктурних об'єктах необхідно використовувати складне, високоточне і дороге обладнання [4]. Схеми проведення експериментів є унікальними, але не відрізняються різноманіттям, хоча лабораторних експериментів виконано дуже багато [5]. У таких умовах особливу роль відіграють чисельні методи моделювання механічних випробувань наностуктурних об'єктів.

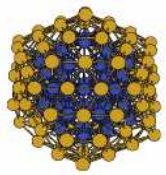
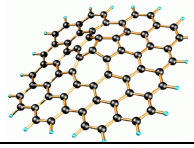
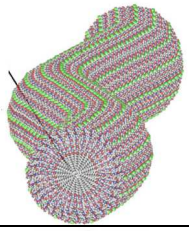
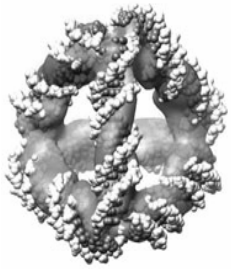
Використання композиційних матеріалів відкриває широкі можливості у регулюванні фізико-механічних характеристик: зміцнення зі збереженням пластичності і високої в'язкості [4], зменшення або підвищення коефіцієнта тертя, надання матеріалам дисипативних характеристик [6]. Однак основною з проблем, що виникає при використанні таких матеріалів, є необхідність визначення їх характеристик, що значно ускладнено різноманітною внутрішньою структурою нанокомпозитів. Враховуючи стратегію технологічних розробок конструкцій із нових матеріалів, актуальним є дослідження нанокомпозитних матеріалів з метою подальшого аналізу одержаних результатів та синтеза конструкцій.

Аналіз досліджень і публікацій

Існує багато класифікацій наноструктур [7; 8], найпоширенішу з яких наведено у таблиці 1 [9]. Усі наведені наноструктури застосовуються у нанотехнологіях.

Таблиця 1

Класифікація наноструктур

Суцільні			Пористі	
	Клас	Зображення	Клас	Зображення
3D	Наночастинки – нанокристали, нанокластери		Нанотрубки	
2D	Наноплівки			
1D	Нанонитки, нановолокна		Об’ємні нано-структури	
0D	Квантові точки			

Армуючі елементи у вигляді наноутворень можуть бути складені із найпростіших наноструктур: набору нанониток, зв’язок нанотрубок, нановолокон та інших утворень зі складною внутрішньою структурою у вигляді декількох підрівнів. Такі наностуктурні утворення називають складними. Складні утворення поділяють на 13 типів [10]. Наноструктурні утворення складаються із наномолекул, розміри яких відповідають нанометровому діапазону розмірів (рисунок 1) [11], проте довжина деяких утворень досягає макрорівня.

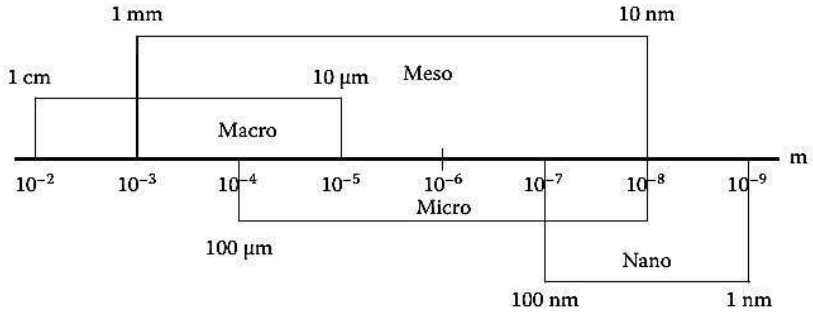


Рис. 1. Розміри наноструктурних утворень

У нанометровому масштабі стають суттєвими сили міжатомної взаємодії, магнітні, розмірні та інші ефекти, які в основному описуються квантовою механікою [4]. Механіка деформівного твердого тіла цю проблему вирішує послідовним застосуванням принципів континуалізації та гомогенізації [8].

Оскільки наноструктури складаються з дискретних елементів (молекул і атомів), виникає питання щодо меж застосування методів механіки суцільного середовища [11, 13], які описують механічні процеси у кожному компоненті композитного матеріалу. Точного і математично обґрунтованого рішення цього питання поки що не існує. Найчастіше застосовують межі механіки мікрокомпозитів [8]. Такий крок не є істинним для всіх рівнів у рамках механіки матеріалів, межа застосування якої значно розширилася.

Наноструктури як простої, так і складної конфігурації широко застосовуються у нанокомпозитних матеріалах (НКМ) з полімерною матрицею. Про це свідчать чисельні публікації у наукових періодичних виданнях, нових монографіях та матеріалах конференцій. Проте, як засвідчують автори найбільш об'ємного в галузі наноструктур і наноматеріалів посібника [11], систематичної розробки моделей наномеханіки і їх застосування для дослідження наноматеріалів до 2007 року здійснено не було. Хоча відома монографія [12] автора W. K. Liu, а також більш пізня монографія автора K.T. Ramesh [13], де було побудовано елементи основ наномеханіки, ще й досі дана наука перебуває у початковому стані свого розвитку.

Систематизації існуючих методів досліджень полімерних НКМ присвячена стаття [14]. Ця проблема, а також основні підходи до її вирішення висвітлюються у роботах [12-14]. Найбільш поширеними методами досліджень НКМ є:

1) методи молекулярного рівня (молекулярної динаміки, статистичний метод Монте-Карло);

2) методи мікрорівня (броунівська динаміка, дисипативна динаміка частинок, решіток Больцмана, нестаціонарний метод Гінзбурга-Ландау);

3) мезо- і мікромасштабні методи (методи мікромеханіки, механіки еквівалентного континуума з осередненими властивостями, метод скінченних елементів).

За допомогою розроблених моделей наноутворень у рамках механіки нанокомпозитів із полімерною матрицею [8] стає можливим досліження проблем статики, динаміки, стійкості і руйнування НКМ [11]. Слід зазначити, що при цьому використовують методи і підходи, розроблені для механіки мікрокомпозитів. У механіці мікрокомпозитів для вирішення таких задач, як правило, застосовується модель частинно-однорідного середовища з осередненими властивостями.

При проведенні теоретичних досліжень у рамках механіки елементів конструкцій з НКМ застосовують феноменологічний підхід, який приймає постулати механіки суцільного середовища. Оскільки НКМ розглядається як однорідний або квазіоднорідний матеріал з осередненими властивостями, стає можливим застосування інтегрального і диференціального числення. Виділяють диференціально малий елемент dV, так званий представницький елемент, усереднені характеристики якого відображають властивості всього об'єму матеріалу. Для такого елемента усереднені за об'ємом компоненти тензорів напружень і деформацій при певних граничних умовах дорівнюють відповідним величинам для всього НКМ. Характеристики цього квазіоднорідного матеріалу називають ефективними характеристиками. Метод усереднення дозволяє знайти матеріальні тензори теоретично. Це важливо, оскільки не має потреби у додаткових експериментальних дослідженнях [13]. Вхідними параметрами при використанні методу усереднень є механічні характеристики матеріалів композитів та їх геометричні моделі.

Ефективні характеристики НКМ можна визначити за допомогою наближених методів. Ці методи не завжди відображають реальну картину розподілу напружень і деформацій і є прийнятними лише для матеріалів регулярної структури – коли форма армуючих елементів наближається до простих геометричних форм, що не характерно для більшості НКМ, за винятком вуглецевих нанотрубок у досить вузькому діапазоні структур [10]. Неточність методів є причиною значних відмінностей знайдених характеристик від реальних, тому постає питання про підвищення точності розрахунків.

Підвищити точність розрахунків дозволяють варіаційні методи механіки деформівного твердого тіла. Енергетичні методи широко використовуються для визначення ефективних характеристик композиційних матеріалів [15] і, враховуючи наведені припущення, можуть бути застосовані для НКМ.

Ефективні характеристики визначаються усередненими тензорами напружень та деформацій і залежать від точності їх визначення. Врахувати складні граничні умови, структурну неоднорідність, реальний розподіл напружень і деформацій у матеріалі можна за допомогою чисельних методів. Серед таких методів найбільше розповсюдження

одержав метод скінченних елементів (МСЕ). Застосування МСЕ для визначення характеристик НКМ не стало виключенням.

Цілі досліджень. Аналіз існуючих публікацій показав, що наукові дослідження у сфері наноматеріалів спрямовані на побудову математичних моделей і визначення ефективних характеристик нового класу матеріалів – нанокомпозитних матеріалів. У зв'язку з цим було сформульовано наступні цілі досліджень:

1. Побудова математичних моделей нанокомпозитних матеріалів зі складними наноструктурами.
2. Знаходження ефективних фізико-механічних характеристик нанокомпозитних матеріалів (пружних і дисипативних).
3. Аналіз характеристик нанокомпозитних матеріалів.

Виклад основного матеріалу. У цій роботі для знаходження рішень крайових задач у представницьких об'ємах використовується метод скінченних елементів у варіанті методу переміщень, що дозволяє одержати уточнену картину напружено- деформованого стану [15]. Реалізацію МСЕ здійснено за допомогою ліцензійного програмного забезпечення ANSYS 12.0 Academic Teaching. Основуючись на прийнятих припущеннях [11], проводимо процедуру гомогенізації наноструктур і моделюємо полімерний НКМ як в'язкопружний композиційний матеріал.

Для побудови скінченно-елементних моделей нанокомпозиційних матеріалів було використано об'ємний 20-вузловий скінченний елемент 20node 186 з бібліотеки ANSYS.

Для одержання компонент матриці комплексних модулів розглядаються відповідні до варіанта анізотропії граничні умови, а також їх комбінації. Варіантів комбінацій граничних умов (n) стільки, скільки незалежних компонент містить матриця модулів.

Після забезпечення граничних умов і розв'язання задачі відносно деформацій визначаються пружна $U'_{нкм}$ і дисипативна $U''_{нкм}$ частини енергії матеріалу.

Для визначення компонент матриці модулів прирівнюються вирази для пружної і дисипативної частини енергії нанокомпозитного і квазіоднорідного матеріалів:

$$U'_{нкм} = U'_{ефм}, U''_{нкм} = U'_{ефм}, а \quad б \quad U'_{нкм} = \frac{1}{2}\varepsilon_0^T C'_{ефм}\varepsilon_0, U''_{нкм} = \frac{1}{2\varepsilon}\pi_0^T C''_{ефм}\varepsilon_0 \qquad (1)$$

Дійсні й уявні компоненти матриці модулів знаходяться як корені системи рівнянь:

$$\begin{aligned} &\varepsilon_0^{\langle k\rangle} C'_{ефм}\varepsilon^{\langle k\rangle} = 2U'_{нкм}{}^{\langle k\rangle}, \\ &\varepsilon_0^{\langle k\rangle} C''_{ефм}\varepsilon^{\langle k\rangle} = \frac{1}{\pi}U''_{нкм}{}^{\langle k\rangle}, \\ &(k = 1 \quad n) \end{aligned} \qquad (2)$$

Декременти коливань для кожної комбінації визначаються за формулою:

$$\Delta^{\langle k\rangle} = \pi\frac{\varepsilon_0^{\langle k\rangle T} C''\varepsilon^{\langle k\rangle}}{\varepsilon_0^{\langle k\rangle T} C'\varepsilon^{\langle k\rangle}}. \qquad (3)$$

За енергетичним методом проведемо аналіз залежностей компонент дійсної та уявної частини матриці модулів і декрементів коливань від коефіцієнта армування наноструктурами. Коефіцієнт армування наноструктурними елементами визначається за формулою [8]:

$$\eta_f^{(\ )} = \frac{V_f^{(\ )}}{V}, \qquad (4)$$

де $V_f^{(\ )}$ – об'єм матеріалу наповнювача (наноструктура); V – загальний об'єм представницького елементу.

Звісно, що справедливими є залежності:

$$V_m^{(\ )} = V - V_f^{(\ )}, \eta_f^{(\ )} + \eta_m^{(\ )} = 1 \; V = V_f^{(\ )} + V_m^{(\ )}, \qquad (5)$$

де $V_m^{(\ )}$ – об'єм матеріалу матриці; $\eta^{(m)}$ – об'ємна концентрація елементів зв'язки.

Наповнення матеріалу матриці наноструктурами має свої особливості. Якщо розглянути нанокомпозит і мікрокомпозит з однаковими коефіцієнтами армування ($\eta_{fn}^{(}$ $= \eta_{fm}^{(}$ $)$ то одержуємо співвідношення [9]

$$S_n^{)} \approx 1 \quad {}_m, \tag{6}$$

де S_n, S_m – площі поверхонь розділу нанонаповнювача та мікронаповнювача відповідно.

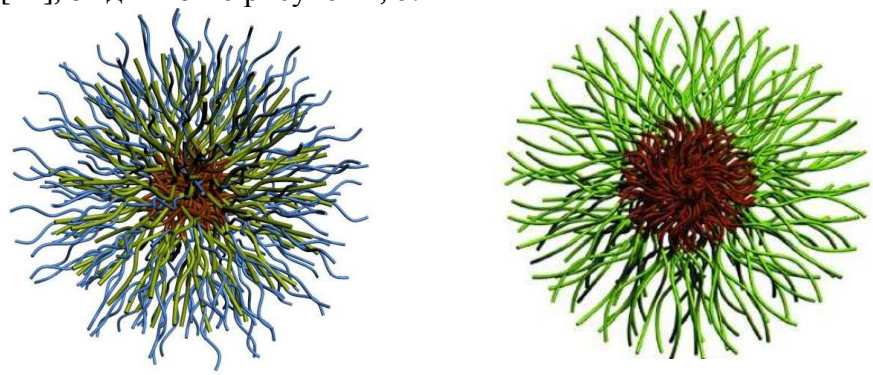
Для об'ємних концентрацій наповнювача при однакових площах розділу (S $_n = S_m$) [8]

$$\eta_{fn}^{(} \approx 1 \quad {}^{-1} \eta_{fm}^{(}. \tag{7}$$

Наведені оцінки більшою мірою пояснюють актуальність розробки полімерних матриць, які б забезпечили надійну адгезію при значному збільшенні площі поверхонь розділу, а також синтез відповідних до цих вимог наноструктур. Одними із таких структур є гранульовані наноструктури складної будови, до яких відносять «бородату кнедлеподібну» наногранулу або міцелу [3, 10].

Моделі «бородатої кнедлеподібної» наногранули. Міцелярні системи утворюють наноструктури, які можуть містити від десятків до сотень молекул, які у свою чергу складають міцелу (рис. 2) [16; 17]. Міцели відносять до самоорганізованих наносиситем (нанокластерів). Вони являють собою найчастіше сферичну нанограну, густо покриту довгими нановолосками у вигляді волокон, – такі утворення називають наночастинками кнедлеподібного типу.

На рисунку 2, *а* показано полімерну міцелу з роботи [16]. Така кнедлеподібна міцела складається із суміші (50 % – 50 % по вазі) полімерів PEG-g-PAA-b-(PPF-co-PS) і PFCE, що самоутворюється при додаванні у суміш наночистої води. Діаметр міцели дорівнює 17-26 нм. Подальший розвиток питання синтеза такої наноструктури проводиться в роботі [17], звідки взято рисунок 2, *б*.



а) *б)*

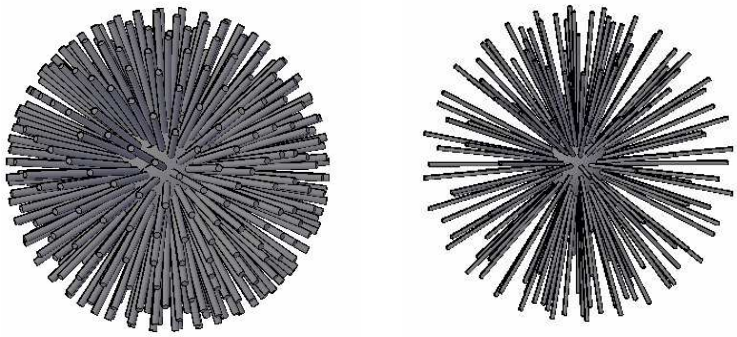
Рис. 2. «Бородата кнедлеподібна» міцела з роботи [16] (а) і з роботи [17] (б)

Механічні властивості наногранули вважаються відомими – це властивості ізотропного ядра та ізотропних волосків (рис. 3), які континуалізовані і розглядаються як виконані із одного і того ж матеріалу, але, можливо, різних властивостей через виникнення масштабних ефектів [10].

а) *б)*

Рис. 3. Два варіанти ізотропних волосків

Розрахункова схема «бородатої кнедлеподібної» наногранули основана на ідеалізації геометричних і механічних характеристик. На рисунку 4 показано розроблені за допомогою CAD-систем розрахункові параметричні моделі наногранули. За їх допомогою моделюємо механічні процеси взаємодії наповнювача, який має значну площу поверхонь розділу із матрицею.

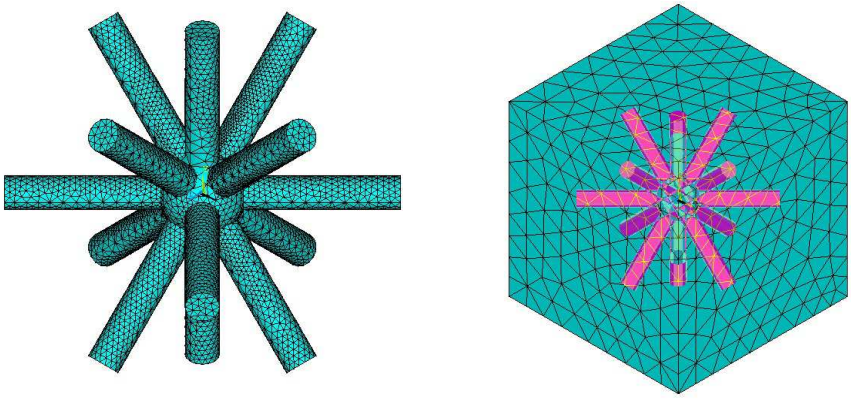


а) *б)*

Рис. 4. Дві моделі нанограну з більшою (а) і меншою (б) кількістю волосків

Недоліком таких моделей є значні потреби у машинному часі та пам'яті при розрахунку. Тому в ході роботи було застосовано декілька підходів до вирішення цієї проблеми:

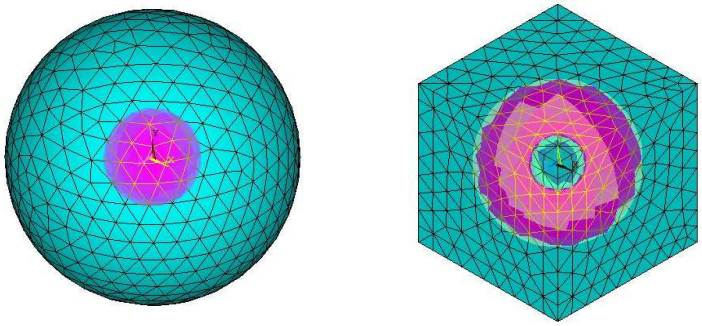
1) побудова розрахункової схеми з «приведеними волосками». Оскільки волосків багато, то деяку їх кількість моделюємо одним суцільним ізотропним тілом з властивостями ядра міцели (рис. 5, *а*). Структура наноматеріала з таким включенням показано на рис. 5, *б*;



а) *б)*

Рис. 5. Ядро з «приведеними» волосками (а) і структура наноматеріалу з міцелою (б)

2) застосування теорії суміші для моделювання шару волосків міцели. Вважається, що в результаті такого моделювання нанокомпозитний матеріал складається із трьох компонентів: гранули – ядра, шару покриття, який моделює усереднений матеріал волосків і основи, та матриці (рис. 6) [10].



а) *б)*

Рис. 6. Ядро з шаром покриття (а) і структура матеріалу (б)

У ході роботи було порівняно підходи, які застосувалися до розрахункових схем нанограну. Згідно з енергетичним методом для визначення ефективних характеристик із нанокомпозита виділяємо представницький елемент об'єму (рис. 7).

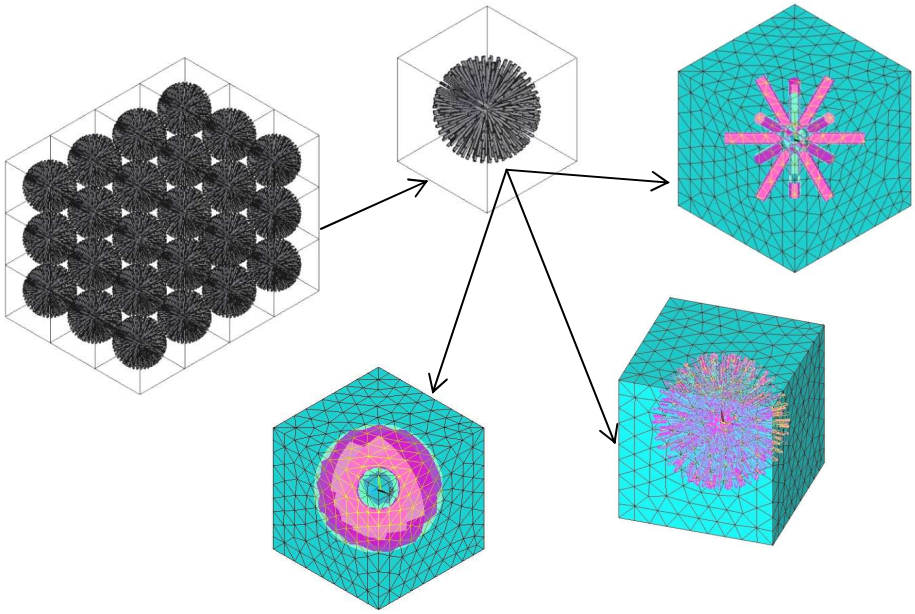
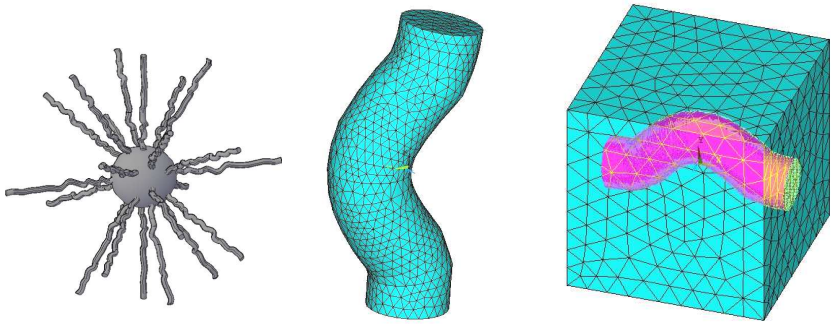


Рис. 7. Виділення представницького елементу об'єму

Моделі волокнистого НКМ з періодичними викривленнями. Викривлені волокнисті наноструктури поділяють на об'єкти з дрібномасштабними і великомасштабними викривленнями [10]. Актуальність питання зумовлено поширенням волокнистих наноструктур як самостійних армуючих елементів, а також як складових кнедлеподібної наногранули (рис. 8, *а*). Побудова основ механіки нанокомпозитів із викривленнями базується на застосуванні частинно-однорідної моделі матеріалу [11].



а) *б)* *в)*

Рис. 8. Міцела з викривленими волосками (а), розрахункова модель нанотрубки (б), представницький елемент об'єму НМК із періодичними викривленнями (в)

Розрахункова модель (рис. 8, *б*) відображає півхвилю однієї із великої кількості нанотрубок в об'ємі матеріалу. Представницький елемент об'єму волокнистого НКМ із періодичними викривленнями показано на рисунку 8, *в*.

Характеристики складових полімерного нанокомпозита представлено у таблиці 2 [9].

Таблиця 2

Характеристики складових полімерного НКМ

Матеріал	Модуль пружності, ГПа	Коефіцієнт Пуассона	Декремент коливань
Матриця – епоксидна смола EPON 828	2,68	0,4	0,2513
Наповнювач – міцела	268	0,3	0,0565
Наповнювач – нановолокно	268	0,3	0,0565

Взявши за основу положення теорії суміші, для тришарового нанокомпозита визначимо дійсні E' і уявні E'' модулі пружності шару покриття за формулою

$$E' = E'^{(f)}\eta^{(f)} + E'^{(m)}\eta^{(m)}, E'' = E''^{(f)}\eta^{(f)} + E''^{(m)}\eta^{(m)}, \quad (8)$$

де $E'^{(f)}$, $E'^{(m)}$ – відповідно дійсні модулі пружності наповнювача та матриці; $E''^{(f)}$, $E''^{(m)}$ – уявні модулі пружності наповнювача та матриці.

Результати обчислень модулів пружності для різних коефіцієнтів армування $\eta^{(f)}$ наведено у таблиці 3. При виборі значень концентрацій враховувались особливості наноструктур.

Таблиця 3

Модулі пружності покриття нанограну ли

$\eta^{(f)}$	0,1	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,5
E', ГПа	29,212	55,744	69,010	82,276	95,542	108,808	135,340
E'', ГПа	0,675	1,135	1,366	1,596	1,826	2,057	2,517

За результатами проведених досліджень з'ясуємо вплив геометричної форми моделей і коефіцієнта армування на пружні та дисипативні характеристики НКМ. Одержані результати для тришарової нанограну ли показано на рисунках 9-10, для нанограну ли з «приведеними волосками» – на рисунках 11-12.

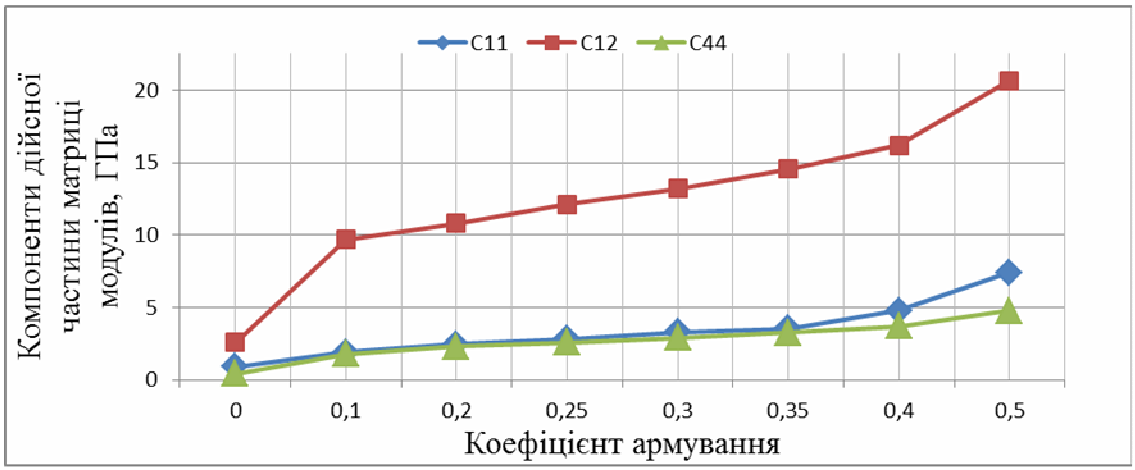


Рис. 9. Залежність компонент C11, C12, C44 дійсної частини матриці модулів від коефіцієнта армування для тришарової нанограну ли

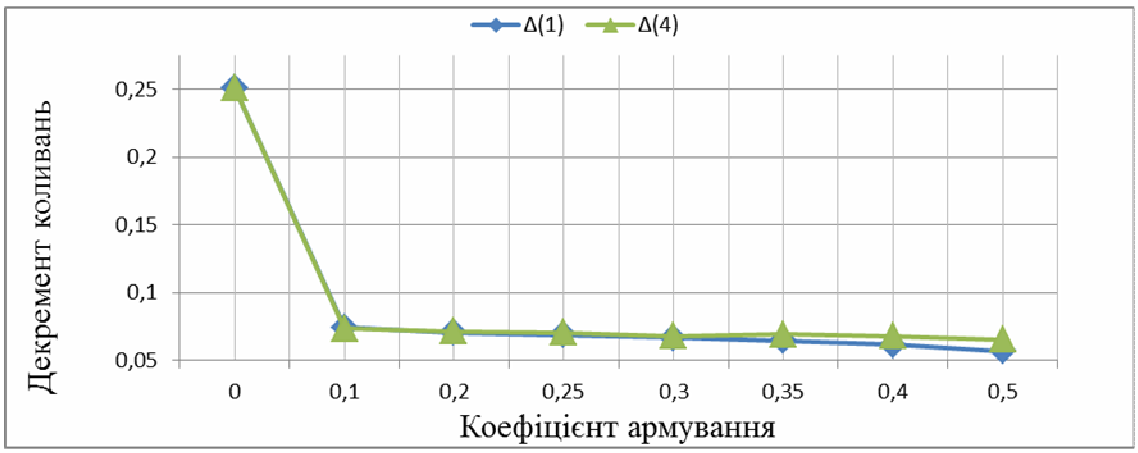


Рис. 10. Залежність декрементів коливань від коефіцієнта армування для тришарової нанограну ли

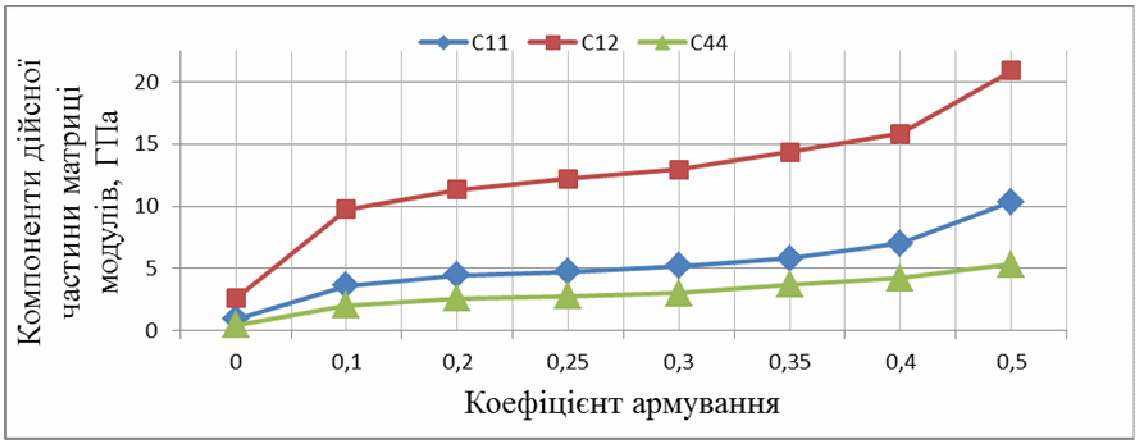


Рис. 11. Залежність компонент C11, C12, C44 дійсної частини матриці модулів від коефіцієнта армування для нанограну ли з приведеними волосками

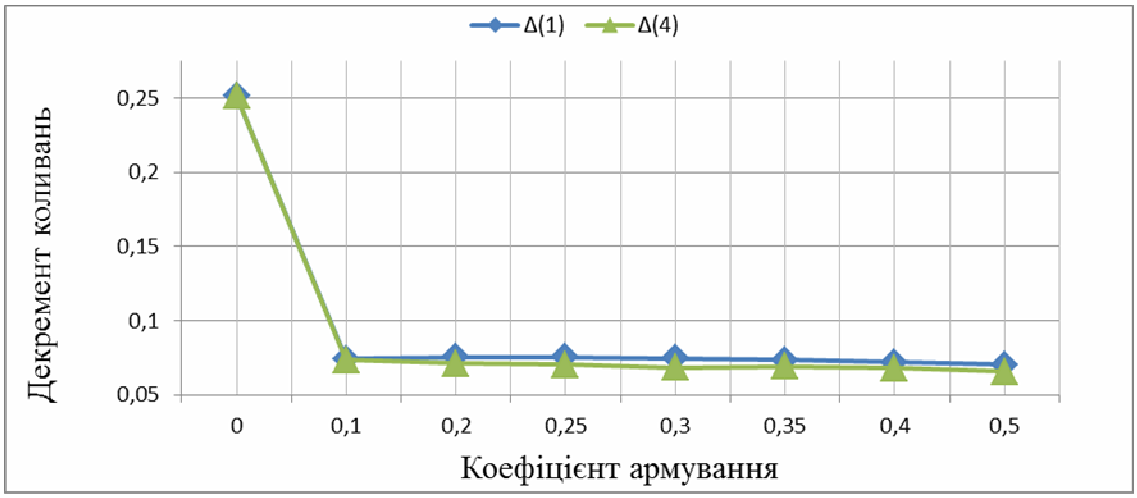


Рис. 12. Залежність декрементів коливань від коефіцієнта армування для нанограну ли з приведеними волосками

Результати досліджень для нанограну ли з матеріала ядра показано на рисунках 13-14.

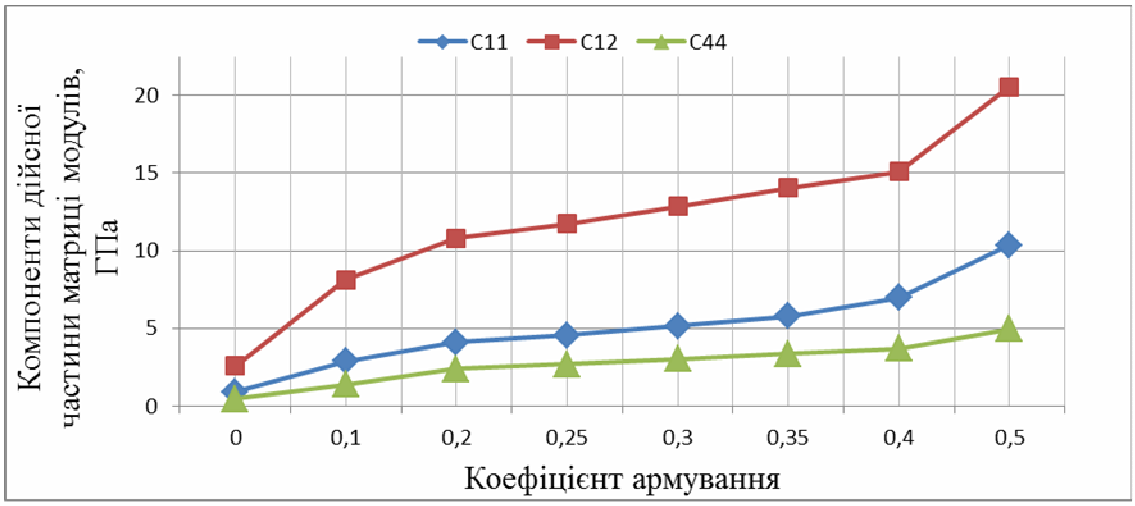


Рис. 13. Залежність компонент C11, C12, C44 дійсної частини матриці модулів від коефіцієнта армування для нанограну ли з матеріалу ядра

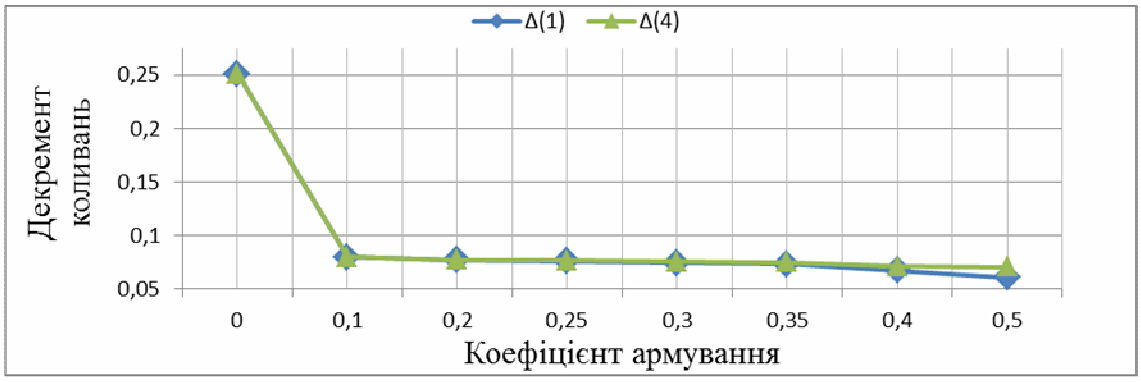


Рис. 14. Залежність декрементів коливань від коефіцієнта армування для нанограну ли з матеріалу ядра

Як видно з рисунків 9-14, дійсні компоненти матриці модулів зі зростанням коефіцієнта армування збільшуються, а значення декрементів коливань зменшуються. Майже незмінні значення декремента коливань на проміжку від 0,1 до 0,5 для коефіцієнта армування вказують на гарні демпфіруючі властивості матеріалу, що забезпечує зменшення часу затухання нестаціонарних коливальних процесів.

Порівняємо одержані результати для декрементів коливань.

З рисунка 15 видно, що при невеликих значеннях коефіцієнта армування значення декрементів коливань для тришарової моделі та моделі з приведеними волосками майже співпадають. При великих значеннях коефіцієнта армування застосування цієї моделі є неефективним, оскільки результати є близькими до результатів для гранули з матеріалу ядра.

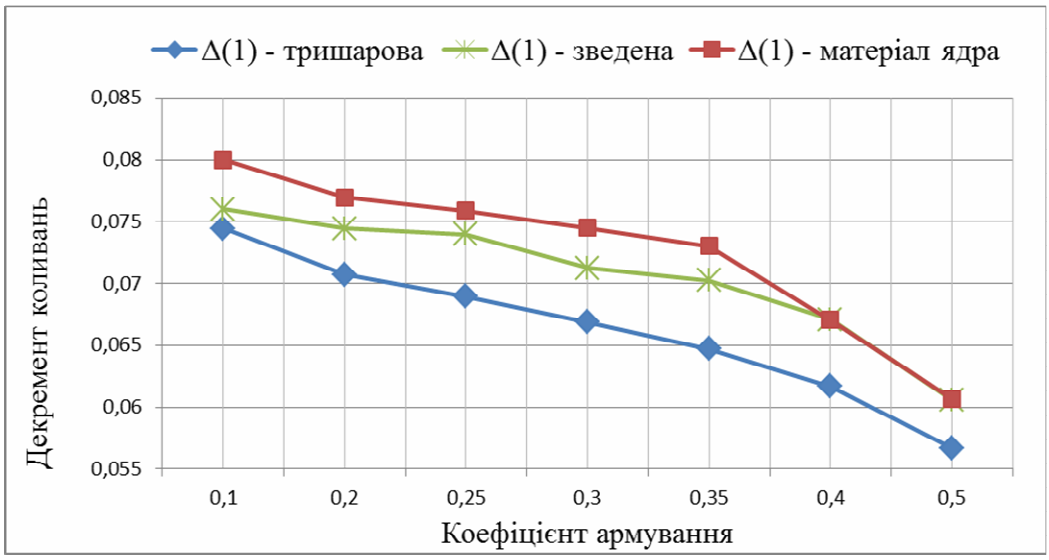


Рис. 15. Залежність декрементів коливань від коефіцієнта армування для різних моделей матеріалів

Для НКМ, армованого нановолокном, одержані результати показано у вигляді рисунків 16-19.

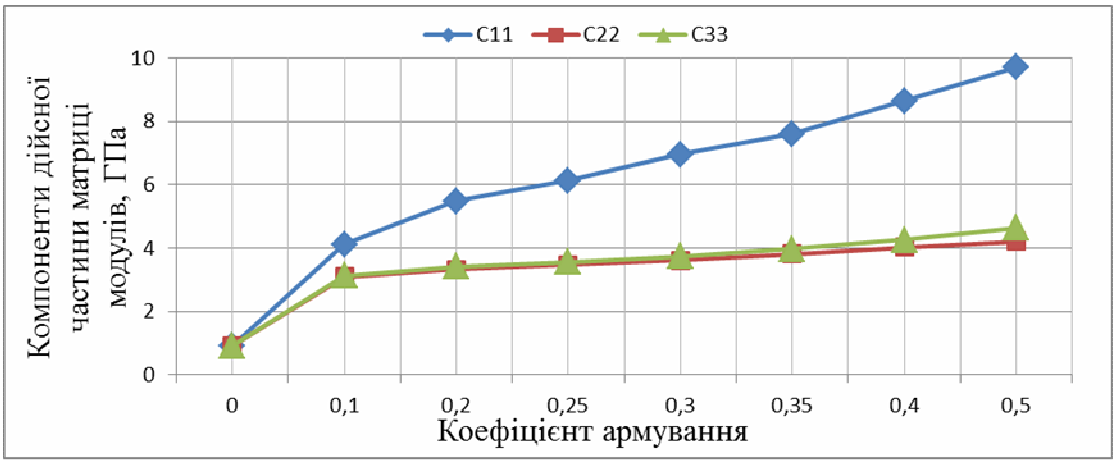


Рис. 16. Залежність компонент C11, C22, C33 дійсної частини матриці модулів від коефіцієнта армування для НМК, армованого нановолокном

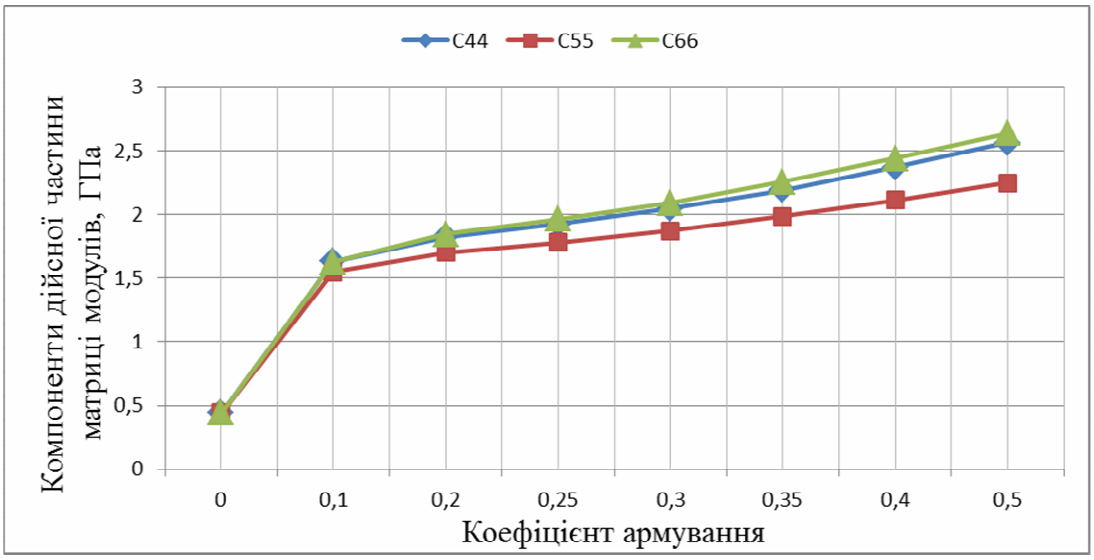


Рис. 17. Залежність компонент C44, C55, C66 дійсної частини матриці модулів від коефіцієнта армування для НМК, армованого нановолокном

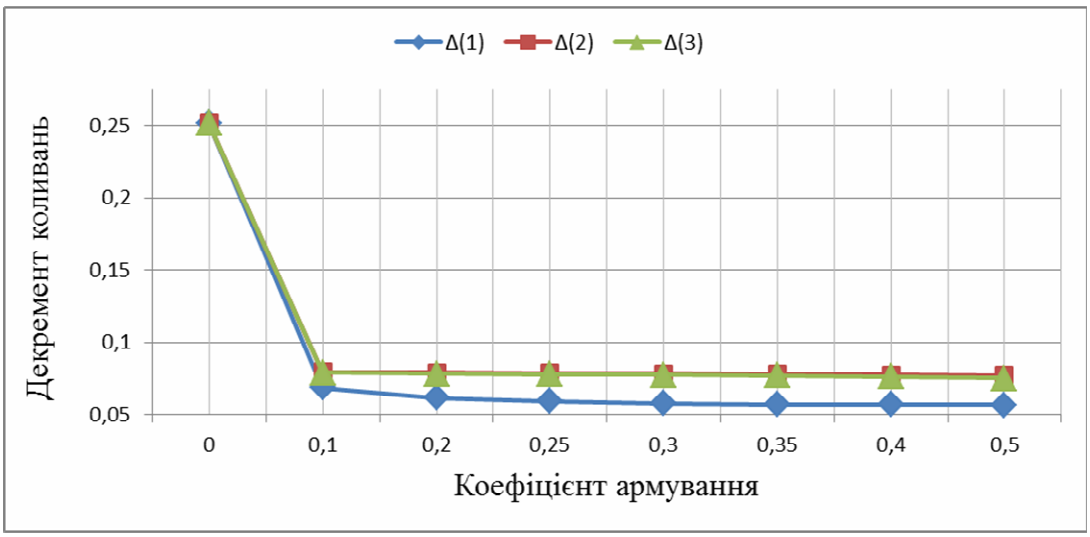


Рис. 18. Залежність декрементів коливань від коефіцієнта армування для НМК, армованого нановолокном, при розтягу

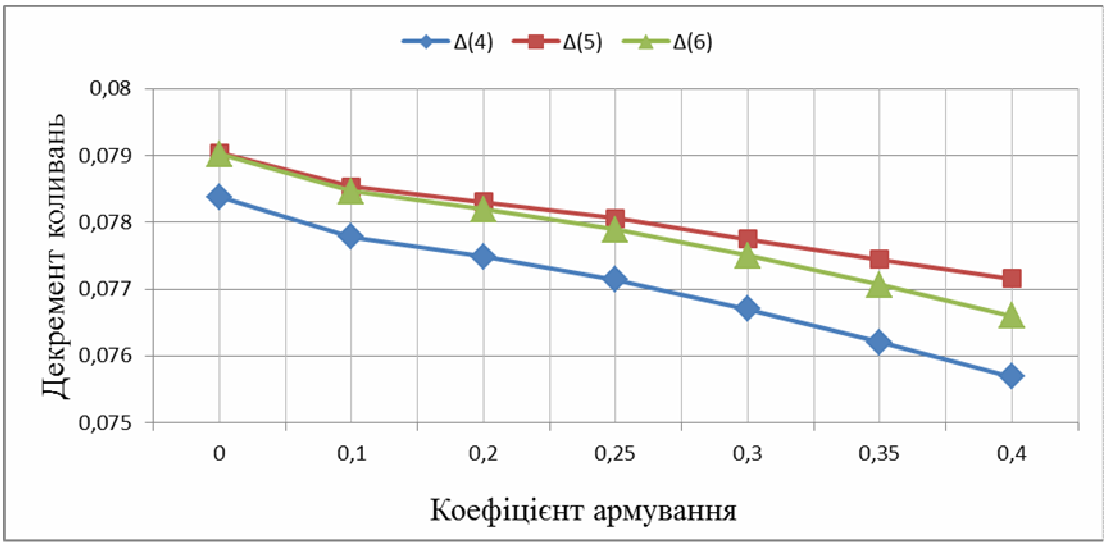


Рис. 19. Залежність декрементів коливань від коефіцієнта армування для НМК, армованого нановолокном, при зсуві

Як видно із рисунків 16-19, дійсні компоненти матриці модулів зі зростанням коефіцієнта армування збільшуються, а значення декрементів коливань зменшуються. Порівняно з НКМ, армованого «бородатою кнедлеподібною» наногранулою, результати для цього НКМ вказують на менші значення декрементів коливань, а отже гірші дисипативні властивості при однакових коефіцієнтах армування.

Знайдені усереднені характеристики представницького елемента відображають характеристики всього нанокомпозитного матеріалу (табл. 4).

Таблиця 4

Пружні характеристики представницького елемента НКМ, армованого нановолокном

$\eta^{(f)}$	0,1	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,5
E1, ГПа	7,070	7,356	7,779	8,535	8,879	9,938	11,421
E2, ГПа	5,810	7,033	7,832	9,034	9,621	11,20	12,60
E3, ГПа	19,439	23,318	27,0311	30,725	34,015	39,914	53,596
ν12	0,415	0,435	0,442	0,451	0,452	0,458	0,460

Як видно з таблиці 4, зі зростанням коефіцієнта армування відбувається збільшення пружних характеристик композиційного матеріалу. При максимальному значенні коефіцієнта армування 0,5 в порівнянні з нульовим спостерігається збільшення модуля пружності E1 в 4,3 рази, для модуля пружності E2 – в 4,7 рази, для модуля пружності E3 – в 20 разів.

Висновки

У роботі одержано такі основні результати:

1. Показано можливість застосування енергетичного методу для визначення ефективних характеристик нанокомпозитного матеріалу з елементами складної внутрішньої структури.

2. Побудовано математичні моделі нанокомпозитних матеріалів з наповнювачами складної структури: «бородата кнедлеподібна» наногранула (міцела) та нановолокно з періодичними викривленнями. Розроблено три варіанта моделей складної наногранули і проведено порівняння моделей нанокомпозитного матеріалу.

3. Визначено дійсні та уявні компоненти матриці модулів і декременти коливань матеріалів при різних коефіцієнтах армування. Досліджено вплив коефіцієнта армування на визначені ефективні характеристики нанокомпозитних матеріалів з двома видами анізотропії: ізотропного та ортотропного матеріалів. Для ортотропного нанокомпозит-

ного матеріалу, армованого періодично викривленими волокнами, одержано числові значення повздовжніх та поперечних модулів пружності та коефіцієнта Пуассона.

4. Значення декремента коливань нанокомпозитного матеріалу, армованого наногранулою, з приведеними волосками при малих значеннях коефіцієнта армування наближається до значень для тришарової моделі. Оскільки в нанокомпозитних матеріалах немає необхідності у великих коефіцієнтах армування, то доцільно продовжити дослідження моделі з приведеними волосками при малих коефіцієнтах армування з метою визначення ефективності застосування цієї математичної моделі.

Одержані результати можуть бути застосовані для аналізу розсіяння енергії в елементах конструкцій з нанокомпозитних матеріалів на полімерній основі. Застосування нанокомпозиних матеріалів на полімерній основі дозволяє підвищити рівень розсіяння енергії. Розробка і впровадження таких матеріалів є однією з основних задач інженерної діяльності. Використання наноматеріалів відкриває широкий клас задач, знаходження розв'язків яких дозволить створювати конструкції з регульованими й оптимізованими властивостями.

Список використаних джерел

1. Наноструктурные материалы: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / Р. А. Андриевский, А. В. Рагуля. – М.: Академия, 2005. – 192 с.

2. Механика материалов и структур нано- и микротехники: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / О. П. Кормилицын, Ю. А. Шукейло. – М.: Академия, 2008. – 224 с.

3. Основы нанотехнологий и наноматериалов: учеб. пособие / П. А. Витязь, Н. А. Свидунович. – Минск: Выща шк., 2010. – 302 с.

4. Ковтун Г. Л. Наноматериалы: технологии и материаловедение: Обзор / Г. Л. Ковтун, А. Л. Веревкин – Харьков: ННЦ ХФТИ, 2010. – 73 с.

5. Polymer – based materials / Charef Harrats. – CRC Press Taylor & Francis Group, 2009. – 325 p.

6. Tribology of polymeric nanocomposites / Edited by Klaus Friedrich, Alois K. Schlarb. – Oxford.: Elsevier, 2011. – 551 p.

7. Ramesh K.T. Nanomaterials mechanics and mechanisms. – Baltimore: The Johns Hopkins University. – 2009. – 316 p.

8. Гузь А. Н. О построении основ механики нанокомпозитов / А. Н. Гузь, Я. Я. Рущицкий, И. А. Гузь // Прикл. механика. – 2007. – Том 43. – № 3. – С. 3-35.

9. Гусев А. И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / А. И. Гусев – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 416 с.

10. Гузь А. Н. Анализ нанокомпозитов сложной структуры (обзор) / А. Н. Гузь, Я. Я. Рущицкий // Прикл. механика. – 2011. – Том 47. – № 4. – С. 3-75.

11. Handbook of Nanophysics/ Ed. K. D. Sattler. – Boca Raton – London: CRC Press, Taylor and Francis Group, 2010. – 827 p.

12. Ramesh K.T. Nanomaterials mechanics and mechanisms. – Baltimore: The Johns Hopkins University. – 2009. – 316 p.

13. Zeng Q.H., Yu A.B., Lu G.Q. Multiscale modeling and simulation of polymer nanocomposites // Prog. Polym. Sci. – 2008. – №33. – P. 191-269.

14. Rubber nanocomposites preparation, properties, and applications / Edited by Sabu Thomas, Ranimol Stephen. – Singapore.: John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd. – PP. 651-674.

15. Яковенко О. О. Чисельний аналіз ефективних динамічних характеристик в'язкопружних композиційних матеріалів: дис… канд. техн. наук: 31.05.10 / О. О. Яковенко; НТУ України «КПІ». – К., 2010. – 153 с.

16. Nystrom A. M., Bartels J. W., Du W. – J., Wooley K. I. Perfluorocarbon-loaded Shell Crosslinked Knedel-like Nanoparticles: Lessons regarding polymer mobility and selfassembly // J. Polymer Science: Part A: Polymer Chemistry. – 2009. – 47. – P. 1023-1037.

17. Nystrom A. M., Karen L., Wooley K. I. The Importance of Chemistry in Creating Well–Defined Nanoscopic Embedded Therapeutics: Devices Capable of the Dual Functions of Imaging and Therapy // J. Polymer Science: Part A: Polymer Chemistry. – 2011. – 44 (10). – P. 969-978.

УДК 678.01:536.21

О.І. Буря, канд. техн. наук
О.Ю. Кузнецова, аспірантка
Дніпропетровський державний аграрний університет, м. Дніпропетровськ, Україна

І.В. Тихонов, канд. техн. наук
ТОВ НВП «Термотекс», м. Митіщі, Росія

О.О. Колбасін, канд. техн. наук
Т.О. Пеліна, студентка
Дніпропетровський державний аграрний університет, м. Дніпропетровськ, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМОСТІЙКОСТІ КОМПОЗИТІВ НА ОСНОВІ ФЕНІЛОНУ ТА ГІБРИДНОГО НАПОВНЮВАЧА

Досліджено вплив вмісту гібридного наповнювача (волокно Русар-С, фулеренова чернь) на термостійкість композитів на основі ароматичного поліаміду фенілон С-2 із застосуванням математичного моделювання. Знайдено оптимальний склад композиції (Русар-С – 11-15, фулеренова чернь – 1,2-1,6, фенілон С-2 - 83,4-87,8. мас.%), що забезпечує її перевагу над базовим полімером за даним параметром на 25 %.

Вступ

Створення полімерних композитів стало об’єктом особливої уваги в останні тридцать років, так як застосування полімерних матеріалів дозволяє вирішувати багато проблем, пов’язаних зі створенням нової техніки, зниженням матеріалоємності і ваги машин, приладів, механізмів, підвищенням їх надійності і довговічності. При цьому особливо важливо розробити композитні матеріали (КМ), що здатні працювати в екстремальних температурних умовах [1].

Одним з найбільш перспективних напрямків у розвитку полімерних композиційних матеріалів є створення гібридних композитів – матеріалів, що включають три й більше компонентів. Ці матеріали дозволяють вирішувати ряд проблем, які не можуть бути усунені використанням моноармованих композитів. Тому для регулювання властивостей КМ та їх анізотропії по всьому об’єму і в різних зонах деталі, а також для оптимізації конструкції виробу доцільно використовувати принцип поліармування (гібридизації), поєднуючи в матеріалі волокна різної природи, волокна з фольгами, стрічками і дисперсними частинками [2; 3].

Враховуючи вищевикладене, мета роботи полягала в розробці, дослідженні термостійкості і визначенні оптимального складу нових полімерних композиційних матеріалів на основі термостійкого ароматичного поліаміду фенілон С-2 (ФС-2).

Об’єкти і методи дослідження

Фенілон С-2 (ТУ 6-05-226-72) – лінійний гетероциклічний кополімер, що містить в основному ланцюгу макромолекули амідну групу -HNCO-, з’єднану по обидва боки фенільними фрагментами, одержують емульсійною поліконденсацією [4] м-фенілендиаміну із сумішшю дихлорангідридів ізофталевої і терефталевої кислот, взятих у молярному співвідношенні 3:2.

Для покращання характеристик у даний полімер був введений гібридний наповнювач, а саме волокно Русар-С (ТУ 2272-001-18059169-99), що є відрізками арамідних ниток завдовжки 5 мм і фулеренова чернь (ФЧ) – фулеренова сажа, нерозчинний чорний порошок, що залишається після вилучення суміші фулеренів неполярними органічними розчинниками, насипна густина 0,5 г/см^3, вміст фулеренів не більше 0,1 %.

Методика отримання композитів полягала в змішуванні компонентів прескомпозиції в обертальному електромагнітному полі, з подальшою переробкою приготовленої таким чином суміші у вироби методом компресійного пресування при температурі 598 К і тиску 40 МПа.

При дослідженні термостійкості застосовували метод термогравіметричного (ТГ) аналізу з використанням дериватографа Q-1500Д системи Ф.Паулік, Й.Паулік і Л.Ердей фірми МОМ (Угорщина). Дослідження проводили в спеціальних керамічних тиглях на повітрі в інтервалі температур 298-1073 К. Швидкість підйому температури – 10 град/хв, як еталонну речовину використовували Al_2O_3, наважка речовини – 100 мг.

Результати й обговорення

При дослідженні органопластиків задача оптимізації складу гібридного наповнювача вирішувалась шляхом постановки активного експерименту, а саме з використанням ортогонального плану 2-го ступеня 3^2 [5].

У таблиці 1 наведені основні рівні зміни вмісту двох компонентів при вивченні впливу ФЧ і волокна Русар-С на термостійкість органопластиків.

Таблиця 1

Рівні перемінних в умовному і натуральному масштабах

Компоненти	Фактор	Середній рівень, мас.%	Крок варіювання, мас.%	Значення рівнів перемінних (мас.%), що відповідають умовним одиницям		
				–1	0	+1
Фулеренова чернь	x_1	1,5	1,0	0,5	1,5	2,5
Русар-С	x_2	11	4	7	11	15

Згідно з прийнятим планом повного факторного експерименту усього було проведено 9 дослідів ($N=9$) (див. табл. 2), кожний з яких повторювали тричі ($k=3$) у випадковому порядку для виключення систематичних помилок.

Математичну модель залежностей $y = f(x_1, x_2)$, що розглядаються, передбачалось шукати у вигляді рівняння регресії:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2,$$

де y – величина, що досліджується, x_i – концентрації наповнювачів, b_i та b_{ij} – коефіцієнти регресії.

Таблиця 2

Схема планування експерименту по вивченню впливу вмісту фулеренової черні та волокна Русар-С на властивості органопластика

Номер досліду	Шифр композиту	Дозування компонентів			
		Умовних одиниць		мас. %	
		x_1	x_2	фулеренова чернь	Русар-С
1	0,5-7	-1	-1	0,5	7
2	2,5-7	+1	-1	2,5	7
3	0,5-15	-1	+1	0,5	15
4	2,5-15	+1	+1	2,5	15
5	1,5-11	0	0	1,5	11
6	2,5-11	+1	0	2,5	11
7	0,5-11	-1	0	0,5	11
8	1,5-15	0	+1	1,5	15
9	1,5-7	0	-1	1,5	7

Для розрахунку коефіцієнтів регресії використовували схему, представлену у таблиці 3, розрахунки проводили на комп’ютері з використанням електронних таблиць пакету OpenOffice.

Таблиця 3

Схема розрахунку коефіцієнтів регресії

Шифр суміші	Матриця для розрахунку коефіцієнтів рівняння						y	x_0y	x_1y	x_2y	$(x'_1)^2y$	$(x'_2)^2y$	x_1x_2y
	x_0	x_1	x_2	$(x'_1)^2$	$(x'_1)^2$	x_1x_2							
0,5-7	1	-1	-1	0,33	0,33	1							
2,5-7	1	1	-1	0,33	0,33	-1							
0,5-15	1	-1	1	0,33	0,33	-1							
2,5-15	1	1	1	0,33	0,33	1							
1,5-11	1	0	0	-0,67	-0,67	0							
2,5-11	1	1	0	0,33	-0,67	0							
0,5-11	1	-1	0	0,33	-0,67	0							
1,5-15	1	0	1	-0,67	0,33	0							
1,5-7	1	0	-1	-0,67	0,33	0							
Σx^2_i	9	6	6	2	2	4	Σ	Σ_{10}	Σ_{11}	Σ_{12}	Σ_{13}	Σ_{14}	Σ_{15}

У наведеній схемі x_i' – скориговані значення рівнів факторів відповідно до вимог ортогональності плану [5], які обчислюються за формулою

$$(x_i')^2 = (x_i)^2 - \frac{\Sigma x_i^2}{N}.$$

Коефіцієнти регресії знаходили за формулами

$$b_0 = \frac{\Sigma x_0 R}{9} - 0{,}67;\ b_{11} - 0{,}67\, b_{22}\ \ b_1 = \frac{\Sigma x_1 R}{6}\ ;\ b_2 = \frac{\Sigma x_2 R}{6}\ ;\ b_{11} = \frac{\Sigma (x_1')^2 R}{2}\ ;$$

$$b_{22} = \frac{\Sigma (x_2')^2 R}{2}\ ;\ b_{12} = \frac{\Sigma x_1 x_2 R}{4}.$$

На основі отриманих експериментальних даних розраховували середні значення функції відгуку $\bar{y}_j = \frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k} y_{ji}$, де $(j = 1,2,.....N)$ та дисперсії паралельних дослідів $s_j^2 = \frac{1}{k-1}\sum_{i=1}^{k}(y_{ji} - \bar{y}_j)^2$. Перевірку однорідності отриманих дисперсій проводили за критерієм Кохрена (*G*):

$$G_p = \frac{max\, s_j^2}{\sum_{j=1}^{N} s_j^2}.$$

Розрахункові значення порівнювали з табличними для ступеня свободи $f_1 = k-1$ і $N = 9$ для довірчого рівня $P=0{,}95$.

Дисперсію відтворення експерименту, з якою пов'язано число ступенів свободи $f_2=N(k-1)$, знаходили згідно з формулою: $s_y^2 = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N} s_j^2$.

Отримані рівняння перевіряли на адекватність. Для цього оцінювали відхилення значень параметру оптимізації $\hat{y}_j$, розраховані за рівняннями від експериментальних $\bar{y}_j$ для кожного із дослідів експерименту, що дозволило визначити дисперсію адекватності для рівного числа паралельних дослідів за формулою:

$$s_{ad}^2 = \frac{k}{N-B}\sum_{j=1}^{N}(\bar{y}_j - \hat{y}_j)^2,$$

де B – число коефіцієнтів рівняння. З нею також пов'язане число ступенів свободи $f_{ад} = N - B$.

Адекватність рівнянь оцінювали за допомогою критерію Фішера (F):

$$F_P = \frac{S_{ad}^2}{S_y^2}.$$

Математична модель вважалася адекватною, якщо значення F було менше ніж табличне, яке шукали для 95 % довірчого рівня.

За основні характеристики термостійкості органопластиків приймали температури, при яких КМ втрачає 5 (T_5), 10 (T_{10}) та 20 (T_{20}) % вихідної маси, які при статистичній обробці результатів досліджень були обрані функціями відгуку (параметрами оптимізації). Результати представлені в таблиці 4.

Таблиця 4

Результати термічних випробувань органопластиків і розрахункові значення параметрів оптимізації

Шифр суміші	T_5, К		Похибка, %	T_{10}, К		Похибка, %	T_{20}, К		Похибка, %
	$\bar{y}_j$	$\hat{y}_j$		$\bar{y}_j$	$\hat{y}_j$		$\bar{y}_j$	$\hat{y}_j$	
0,5-7	617	608	1,4	668	659	1,4	745	734	1,4
2,5-7	625	618	1,1	672	665	1,1	751	741	1,4
0,5-15	658	651	1,0	706	699	1,1	766	760	0,8
2,5-15	636	631	0,8	682	676	0,9	752	746	0,8
1,5-11	650	661	1,6	686	696	1,5	764	777	1,7
2,5-11	631	633	0,4	670	674	0,5	747	752	0,7
0,5-11	632	639	1,0	675	682	1,0	751	756	0,7
1,5-15	663	665	0,4	702	706	0,5	775	776	0,1
1,5-7	631	637	1,0	673	680	1,0	751	761	1,3

Примітка: T_5,T_{10}, T_{20} фенілону С-2 складають 533, 642 і 695К відповідно.

Обчислення коефіцієнтів регресії привело до таких рівнянь (в умовних одиницях):

$$T_5 = 660{,}5 - 2{,}69x_1 + 14{,}02x_2 - 7{,}75x_1x_2 - 24{,}4x_1^2 - 9{,}07x_2^2,$$

$$T_{10} = 696{,}49 - 4{,}38x_1 + 12{,}72x_2 - 7{,}17x_1x_2 - 18{,}56x_1^2 - 3.39x_2^2,$$

$$T_{20} = 776{,}77 - 1{,}89x_1 + 7{,}5x_2 - 5{,}17x_1x_2 - 23x_1^2 - 8{,}5x_2^2.$$

Отримані рівняння перевіряли на адекватність і, як видно із таблиці 5, при рівні значимості 0,05 усі рівняння, що розглядаються, є адекватними. Математичні моделі для наочності і подальшого аналізу були представлені графічно у вигляді поверхонь відгуку, які також були спроектовані на площину у вигляді сукупності ліній рівних значень параметрів оптимізації (рис. 1).

Таблиця 5

Результати статистичного аналізу математичних моделей

Параметр оптимізації	G_p	G_m	s_y^2	s_{ad}^2	F_p	F_m
T_5	0,199	0,478	102,72	300,42	2,92	3,16
T_{10}	0,156	0,478	126,19	348,48	2,76	3,16
T_{20}	0,326	0,478	162,37	437,88	2,70	3,16

З даних, представлених на рис. 1, випливає, що термостійкість збільшується з ростом вмісту волокна Русар-С у всьому дослідженому діапазоні від 7 до 15 мас.%. Що

стосується фулеренової черні, то тут концентраційні криві проходять через максимум при її вмісті 1,5 мас.%.

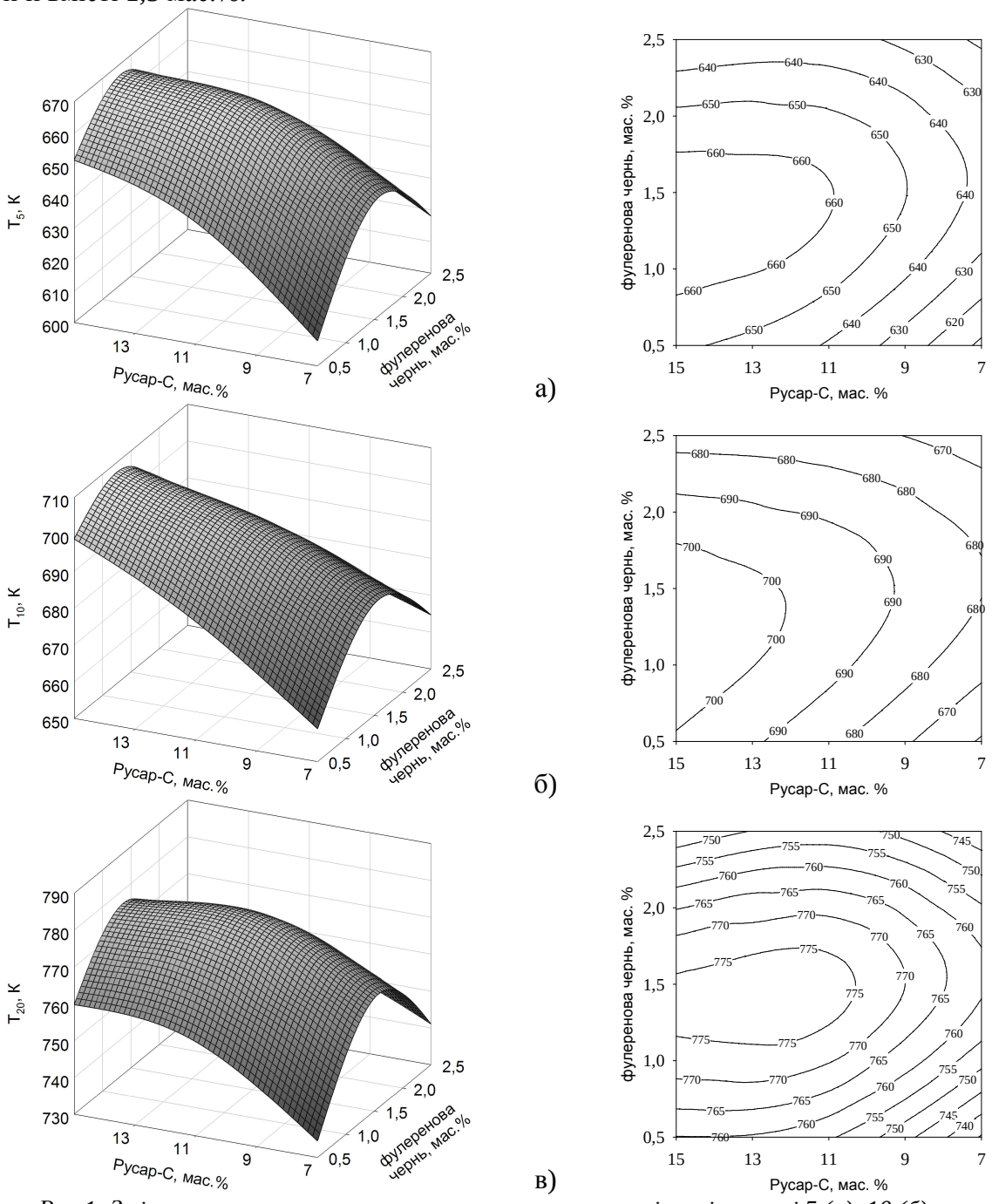


Рис.1. Зміна температури втрати маси органопластиків в кількості 5 (а), 10 (б) та 20 мас.% (в) від вмісту Русару-С та фулеренової черні

У цілому ж найвищі значення термостійкості спостерігаються при наступному складі органопластика, мас.%: фулеренова чернь – 1,2-1,6; Русар-С – 11-15; фенілон С-2 – 83,4-87,8.

Тому в ході подальших досліджень було проаналізовано характер залежності “втрата маси-температура” саме для цього органопластика у порівнянні з вихідним полімером та композитами, що містять одну із складових гібридного наповнювача (ФЧ, Русар-С).

Контури кривих ТГ аналізу представлені на рис.2, з якого можна бачити, що для всіх матеріалів вони є аналогічними.

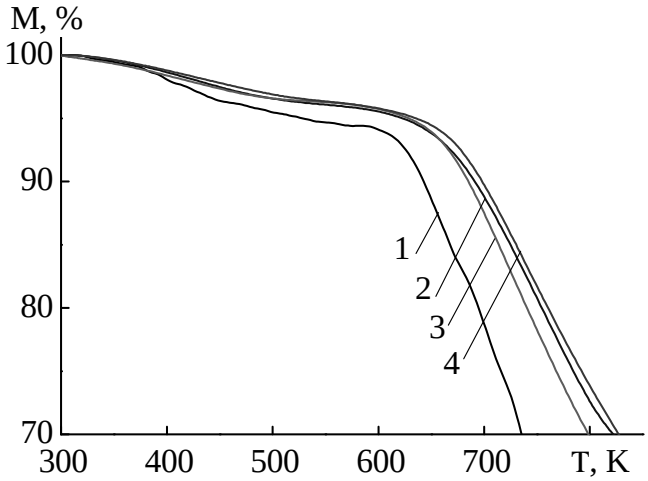


Рис.2. ТГ- криві фенілону С-2(1) і КМ на його основі, що містять, мас.%: фулеренової черні – 1,5 (2); волокна Русар-С – 11 (3); фулеренової черні – 1,5 і волокна Русар-С – 11 (4)

На першому етапі в температурному діапазоні 300-423 К спостерігається поступове зменшення маси (0,4-2,2 %) за рахунок видалення вологи. Потім у тривалому температурному діапазоні (≈ 300 К) маса зразків залишається майже незмінною, після чого починається її інтенсивне зменшення.

З метою вибору оптимальної кінетичної моделі для опису термічної деструкції матеріалів за експериментальними даними, отриманими за допомогою ТГ–аналізу, була розглянута можливість застосування математичних моделей різних гетерогенних процесів [6].

Як відомо, труднощі, що виникають під час оцінки кінетичних параметрів процесів термічного розкладу твердих речовин у заданому температурному інтервалі, пов'язані з великим числом суперечливих даних, на підставі яких отримані кінетичні рівняння, що характеризують різні твердофазні перетворення. Разом з тим, оцінюючи праці учених [6, 7], можна стверджувати про наявність сформованого стереотипу опису твердофазних процесів з вибором в якості критерію оцінки хіміко-технологічного процесу ступеня перетворення α, що визначається за формулою [6]:

$$\alpha = (Go - G) / (Go - G_1),$$

де G_o, G, G_1 – початкова, у поточний момент часу і кінцева маси зразка.

Залежність ступеня перетворення від часу можна виразити у формі диференціального рівняння [7]:

$$d\alpha / d\tau = k f(\alpha), \quad (1)$$

де τ – час; k – константа швидкості реакції; $f(\alpha)$ – алгебраїчна функція, що описує механізм процесу.

Залежність k від температури описується загальновідомим рівнянням Ареніуса [6]:

$$k = Z e^{-Eакт./RT}, \quad (2)$$

де R – універсальна газова стала, кДж/кг·К; e – основа натурального логарифма; Z – передекспоненціальний множник; $E_{акт.}$ – енергія активації, кДж/моль.

З урахуванням залежності *(13)* рівняння *(12)* представили у вигляді:

$$d\alpha/d\tau = Ze^{-Eакт./RT} f(\alpha). \quad (3)$$

Для кінетичного аналізу неізотермічної кривої, одержаної при лінійному нагріванні, існують два математичних методи: інтегральний і диференціальний. У роботі застосовували метод Коатса-Редферна [7] з використанням інтегральних кінетичних рівнянь, що допускає розгляд неізотермічної реакції в нескінченно малому інтервалі часу як ізотермічної. Після інтегрування і логарифмування залежність *(4)* набуває вигляду:

$$lg\frac{k'(\alpha)}{T^2} = lg\frac{ZR}{dT/d\tau \cdot E_{акт.}}\left(1-\frac{2RT}{E_{акт.}}\right) - \left(\frac{E_{акт.}}{2{,}3RT}\right),$$

де $k`(\alpha) = \int_0^{\alpha} \frac{d\alpha}{f(\alpha)}$; $k'(\alpha) = \frac{(1-\alpha)^{1-n}-1}{n-1}$ при $n \neq 1$; $k'(\alpha) = -ln(1-\alpha)$; при $n=1$, де n – порядок реакції.

Якщо припустити, що залежність *[lgk`(α)] - [1/T]* лінійна [7], то в цьому випадку її можна використовувати для визначення механізму гетерогенної реакції. Ця залежність, розрахована безпосередньо за експериментальними величинами α і *T*, буде лінійною тільки для такої функції *k'(α)*, що відповідає найбільш імовірному процесу, що контролює дійсну швидкість реакції [8].

Визначення можливого механізму і розрахунок кінетичних параметрів процесу термодеструкції досліджуваних речовин здійснювали з використанням інтегральних кінетичних рівнянь різних механізмів гетерогенних процесів (табл. 6).

Таблиця 6

Кінетичні рівняння різних механізмів гетерогенних процесів [6]

Кінетичне рівняння	Процес, що визначає швидкість реакції	Математична модель
$k\tau = \alpha$	Зародкоутворення за ступеневим законом n=1	*(4)*
$k\tau = 2\alpha^{1/2}$	Зародкоутворення за ступеневим законом n=2	*(5)*
$k\tau = 2[1 - (1 - \alpha)^{1/2}]$	Реакція на границі розділу фаз: - циліндрична симетрія	*(6)*
$k\tau = 3[1 - (1 - \alpha)^{1/3}]$	- сферична симетрія	*(7)*
$k\tau = -\ln(1 - \alpha)$	Випадкове зародкоутворення, одне ядро на кожну частку	*(8)*
$k\tau = 2[-\ln(1 - \alpha)]^{1/2}$	Випадкове зародкоутворення, рівняння Авраамі-Єрофєєва, n=2	*(9)*
$k\tau = 3[-\ln(1 - \alpha)]^{1/3}$	Випадкове зародкоутворення, рівняння Авраамі-Єрофєєва, n=3	*(10)*
$k\tau = 4[-\ln(1 - \alpha)]^{1/4}$	Випадкове зародкоутворення, рівняння Авраамі-Єрофєєва, n=4	*(11)*
$k\tau = 1/2\ \alpha^2$	Одновимірна дифузія	*(12)*
$k\tau = (1 - \alpha)\ln(1-\alpha) + \alpha$	Двовимірна дифузія, циліндрична симетрія	*(13)*
$k\tau = 3/2[1 - (1 - \alpha^{1/3})]^2$	Тривимірна дифузія, сферична симетрія	*(14)*
$k\tau = \frac{3}{2}[(1 - \frac{2}{3}\alpha) - (1-\alpha)^{2/3}]$	Двовимірна дифузія, рівняння Гістлінга-Броунштейна	*(15)*

Критеріями вибору математичної моделі були коефіцієнт кореляції прямої *r* у координатах рівняння Ареніуса і мінімум функції *S*:

$$S = f\{\alpha(\tau), T(\tau), \Delta T(\tau), E_{акт.}, Z\},$$

$$S = \sqrt{\frac{(\alpha_e - \alpha_p)^2}{m}},$$

де α_e, α_p – експериментальні і розрахункові значення ступеня перетворення; *m* – кількість експериментальних даних; *T* – температура; $E_{акт.}$ – енергія активації; *Z* – передекспоненціальний множник.

Результати розрахунку вихідних параметрів термодеструкції досліджуваних речовин: коефіцієнта кореляції (*r*), мінімуму функції (*S*), енергії активації ($E_{акт.}$), передекспоненціального множника (*Z*), розраховані за програмою, розробленою для ІВМ, приведені в таблиці 7.

Аналіз термодеструкції вихідного фенілону С-2 показав, що найбільш близькі до одиниці значення коефіцієнта кореляції одержано за рівняннями *(7), (8), (12-15)*. Крім того, як допоміжний критерій вибору оптимальних кінетичних моделей використовува-

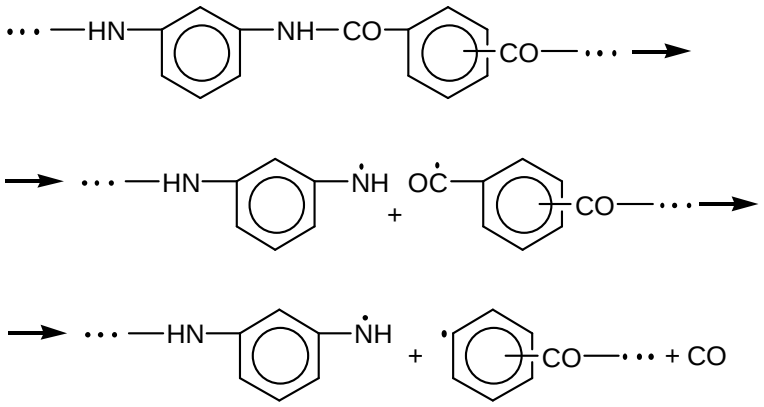
ли мінімальні значення *S*. Таким чином, найбільш адекватно процес термодеструкції композитів описують математичні моделі *(12-15)*, які зображують одно-, дво- і тривимірну дифузію частинок у полімерній матриці – частинки дифундують до шару золи, яка накопичується по мірі згоряння фенілону.

Таблиця 7

Результати розрахунків кінетичних параметрів термодеструкції фенілону С-2 та органопластиків на його основі

Математична модель процесу	*r*	*S*	$E_{акт.}$, *кДж/моль*	*lg Z*
ФС-2				
(7)	0,810	$0{,}72\cdot10^{-1}$	17,55	-2,64
(8)	0,812	$0{,}74\cdot10^{-1}$	19,33	-2,51
(12)	0,925	$0{,}65\cdot10^{-1}$	54,36	-1,29
(13)	0,924	$1{,}05\cdot10^{-1}$	57,49	-1,03
(14)	0,921	$1{,}78\cdot10^{-1}$	60,95	-1,23
(15)	0,923	$1{,}61\cdot10^{-1}$	58,64	-1,42
ФС-2+1,5 мас. % фулеренової черні				
(7)	0,786	$0{,}34\cdot10^{-1}$	10,24	-3,03
(8)	0,815	$0{,}35\cdot10^{-1}$	11,69	-2,92
(12)	0,918	$0{,}38\cdot10^{-1}$	40,86	-2,00
(13)	0,925	$0{,}75\cdot10^{-1}$	43,49	-1,79
(14)	0,931	0,17	46,33	-2,03
(15)	0,927	0,16	44,44	-2,18
ФС-2+11 мас. %Русар-С				
(7)	0,563	$0{,}28\cdot10^{-1}$	4,78	-3,47
(8)	0,625	$0{,}28\cdot10^{-1}$	5,83	-3,38
(12)	0,903	$0{,}29\cdot10^{-1}$	31,40	-2,75
(13)	0,909	$0{,}65\cdot10^{-1}$	33,34	-2,58
(14)	0,915	0,15	35,40	-2,89
(15)	0,911	0,14	34,03	-3,00
ФС-2+0,5 мас. % фулеренової черні та 11 мас. % Русар-С				
(7)	0,762	$0{,}57\cdot10^{-1}$	12,87	-2,91
(8)	0,775	$0{,}59\cdot10^{-1}$	14,50	-2,78
(12)	0,916	$0{,}51\cdot10^{-1}$	45,52	-1,79
(13)	0,917	$0{,}90\cdot10^{-1}$	48,42	-1,55
(14)	0,917	0,17	51,59	-1,77
(15)	0,917	0,16	49,48	-1,94

Таким чином, із одержаних результатів видно, що певна доля реакцій термодеструкції відбувається за радикально-ланцюговим механізмом [7], який включає такі стадії: I – ініціація; II – розвиток ланцюга; III – передача ланцюга; IV – обрив ланцюга. Як відомо, при термічній деструкції полімерів, що містять у ланцюзі ароматичні ядра, основною є стадія ініціації ланцюга. Це підтвердилося і в результаті розрахунку, оскільки кінетичне рівняння *(8)* описує процес випадкового зародкоутворення: фенілон зазнає мономолекулярних перетворень, у результаті яких з валентно-насичених молекул утворюються радикали, що мають порівняно малу реакційну здатність. Враховуючи те, що при термолізі фенілону в першу чергу розщеплюванню піддаються найслабкіші Ph-N і C-N зв'язки [4], можна припустити, що модель *(8)* описує нижчеприведений гомолітичний процес з утворенням вільних радикалів:



Адекватно відображає процес і математична модель реакцій на межі розділу фаз *(7)*. Очевидно, тут відбувається розвиток ланцюга в результаті гетерогенної реакції на межі полімер - газоподібні продукти термолізу (CO_2, CO, H_2, H_2O, NH_3 та ін.).

Що стосується термодеструкції композитів, то доля реакцій, які перебігають за механізмами *(7)*, *(8)*, *(14)*, *(15)*, зменшується, причому особливо суттєво в органопластику, що містить волокно Русар-С. У цьому випадку переважають процеси, що відбуваються за механізмом одно- і двовимірної дифузії.

Висновки

У результаті застосування статистичних методів постановки активного експерименту з використанням ортогонального плану 2-го ступеня отримані математичні моделі, що адекватно описують залежність термостійкості від складу композиції. При дослідженні поверхонь відгуку, отриманих розрахунковим шляхом, встановлено оптимальний склад композиції, що забезпечує її перевагу над базовим полімером по термостійкості на 25 %.

Проаналізовано результати розрахунків кінетичних параметрів термодеструкції, визначено, що основна доля реакцій деструкції полімерних композитів відбувається за механізмом одно- і двовимірної дифузії.

Список використаних джерел

1. Ениколопян Н. С. Композиционные материалы – материалы будущего / Н. С. Ениколопян // Журнал Всесоюзного химического общества им. Д. И. Менделеева. – 1978. – № 3. – С. 243-244.

2. Заболоцкий А. А. Полиармированные (гибридные) композиционные материалы / А. А. Заболоцкий, В. Я. Варшавский // Итоги науки и техники. ВИНИТИ. Композиционные материалы. Том 2. – М., 1984. – 104 с.

3. Кузнецов В. А. Гибридные композиционные материалы на основе химических волокон и нитей с органической матрицей / В. А. Кузнецов // Итоги науки и техники. ВИНИТИ. Химия и технология высокомолекулярных соединений. – 1986. – Вып. 21. – С. 199-249.

4. Соколов Л. Б. Термостойкие ароматические полиамиды / Л. Б. Соколов, В. Д. Герасимов, В. Д. Савинов, В. К. Беляков – М.: Химия, 1975. – 256 с.

5. Планирование эксперимента и применение вычислительной техники в процессе синтеза резины / под ред. В. Ф. Евстратова и А. Г. Шварца. – М.: Химия, 1970. – 255 с.

6. Шестак Я. Теория термического анализа. Физико-химические свойства твердых неорганических веществ: пер. с англ. / Я. Шестак. – М.: Мир, 1987. – 456 с.

7. Коршак В. В. Химическое строение и температурные характеристики полимеров / В. В. Коршак – М.: Изд-во «Наука», 1970. – С. 390.

8. Zuru A.A., Whitehead R., Criffiths D.L. A new technique for determination of the possible reaction mechanism from non-isotermal thermogravimetric data // Thermochim. Acta, 164, 1990. – P. 285-305.

Робота виконана за підтримки ДФФД України, договір № Ф40/149-2011

УДК 620.197.3

О.И. Сизая, д-р техн. наук
В.Н. Челябиева, канд. техн. наук
Ю.В. Квашук, аспирантка
Черниговский государственный технологический университет, г. Чернигов, Украина

ВЛИЯНИЕ ПРОИЗВОДНЫХ 3,4-ДИХЛОР-(2Н)-ПИРИДАЗИН-3-ОНА НА КОРРОЗИОННУЮ СТОЙКОСТЬ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ

Исследована противокоррозионная активность производных 3,4-дихлор-(2Н)-пиридазин-3-она в растворах хлоридной и сульфатной кислот. Результатами исследований подтверждено спрогнозированное ранее квантово-химическими расчетами поведение данных соединений как ингибиторов коррозии. Показано, что эффективность ингибиторов в кислых средах определяется величиной электронной плотности на реакционных центрах молекулы, растворимостью ингибиторов, а также зависит от характера кислотной среды.

Постановка проблемы

Один из распространенных способов борьбы с коррозией систем водо- и теплоснабжения предприятий, металлоконструкций в машиностроении, металлургии, нефтепереработке, нефтегазодобыче и других отраслях – защита металлических сооружений и коммуникаций с помощью ингибиторов.

Исследования многих научных коллективов направлены на поиск взаимосвязи между строением химических соединений и наличием у них высокой противокоррозионной активности [1-14]. Установив подобные закономерности, можно существенно сократить время на экспериментальный поиск эффективных ингибиторов коррозии, а также целенаправленно синтезировать вещества с высокой степенью защиты от коррозии.

Анализ последних исследований и публикаций

Анализ публикаций в области поставленной проблемы показал, что органические вещества, содержащие гетероциклы, ароматические системы, азот, серу, кислородсодержащие функциональные группы, могут быть потенциальными ингибиторами коррозии [1-14].

Квантово-химическими расчетами с использованием современных компьютерных программ (MOPAC, Gaussain 03) авторами ряда публикаций [1-5, 8, 11-14] показано, что в кислых средах противокоррозионные свойства связаны с величиной заряда на реакционных центрах исследуемых соединений, а также зависят от характера кислотной среды. В HCl и H_2SO_4 противокоррозионная активность ингибиторов будет отличаться. Это связано с тем, что поверхность корродирующего металла в хлоридной и сульфатной кислоте имеет разный заряд, также отличается механизм коррозионного процесса в этих кислотах [8]. В кислой среде действие многих ингибиторов коррозии связано, также, с образованием на поверхности металла защитных пленок – металлокомплексных соединений [1-3, 5, 8]. Координационная связь «металл-ингибитор», и, следовательно, степень защиты будет тем прочнее, чем выше электронная плотность на реакционно-активных участках молекулы ингибитора.

В нейтральных и щелочных средах прослеживается зависимость противокоррозионной эффективности от величины дипольного момента молекулы (μ), характеризующего ее способность к физической адсорбции [8].

Авторами научных публикаций, путем квантово-химического расчета с использованием метода semi-empirical PM 3, спрогнозирована противокоррозионная активность новых синтезированных производных 3,4-дихлор-(2Н)-пиридазин-3-она, что требует практического подтверждения [15].

Формулирование цели статьи

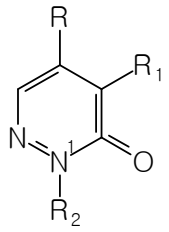
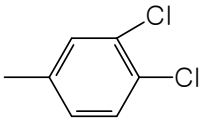
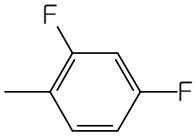
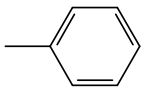
Цель работы – оценить степень сходимости прогнозной оценки противокоррозионной активности гетероциклических соединений ряда 3,4-дихлор-(2Н)-пиридазин-3-она по результатам квантово-химических расчетов с результатами экспериментальных исследований.

Изложение основного материала

Структурные формулы соединений, исследованных в работе, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Структурные формулы и характеристика исследуемых соединений

Условное обозначение	R	R_1	R_2	Молярная масса, г/моль	Заряды на реакционных центрах	
					N	N^1
						
I	Cl	Cl	H	165	-0,059	+0,142
II	Cl	Cl	CH_3	179	-0,056	+0,145
III	Cl	Cl		310	-0,060	+0,248
IV	Cl	Cl		277	-0,061	+0,240
V	NO_2	OH		233	-0,065	+0,242

Состав и строение I-V доказаны спектрами ПМР и данными элементного анализа [15].

Эффективность соединений I-V (1 ммоль/л) как ингибиторов коррозии оценивали на стали Ст3 весовым и стали 20 электрохимическим (потенциостат П-5827М) методами. Коррозионная среда – 0,1н. растворы HCl и H_2SO_4.

Поляризационные кривые (20 мВ/мин) снимали от стационарного потенциала на торцевом электроде из стали 20, впрессованном во фторопластовый кожух. Исследования проводили с применением стеклянной трехэлектродной электрохимической ячейки с разделенными катодным и анодным пространствами, электрод сравнения – хлорид-серебряный, вспомогательный – платиновый. Потенциал рабочего электрода пересчитывали на стандартную водородную шкалу. По поляризационным кривым определяли токи электрохимической коррозии (I_c), катодного ($I_к$ при $E_к$ = -0,46 В) и анодного (I_a при E_a = -0,14 В) парциальных процессов, коэффициенты торможения γ_c, $\gamma_к$, γ_a ($\gamma = I / I^{/}$, где I, $I^{/}$ – ток коррозии без веществ I-V и в их присутствии соответственно) и степень защиты Z_c, $Z_к$, Z_a, ($Z = (1 - 1/\gamma) \times 100\%$).

Для весового метода использовали прямоугольные образцы размером 50,3×22,3×3,2 мм. Поверхность образцов последовательно шлифовали на мелкозернистой бумаге марки Р240 – Р1200, промывали в проточной воде и обезжиривали. После экспозиции (24 часа) поверхность образцов освобождали от продуктов коррозии, промывали проточной водой, обезжиривали, высушивали и взвешивали.

Скорость коррозии рассчитывали по формуле: $K_m = (m_1 – m_2)/ S·t$, где K – скорость коррозии, г/(м^2·час); m_1 – масса образца до испытания, г; m_2 – масса образца после испытания, г; S – площадь поверхности образца, м^2; t – продолжительность исследования, час.

Эффективность защитного действия ингибиторов коррозии оценивали по степени защиты: $Z_m = [(K_m – K'_m) / K_m] ·100\%$, де K_m, K'_m – скорость коррозии металла без веществ I-V и в их присутствии, соответственно, г/(м^2·час). Коэффициент торможения коррозии (γ_m) рассчитывали по формуле: $\gamma_m = K_m / K'_m$.

Статистическую обработку результатов электрохимических исследований проводили для уровня вероятности 0,95, число измерений n = 3.

Полученные экспериментальные данные приведены в табл. 2-6 и на рис. 1.

По результатам гравиметрических исследований, как и предполагалось, все исследованные вещества в определенной степени проявляют противокоррозионную активность [15]. Максимальный защитный эффект наблюдается при введении вещества III – Z_m=82,49%, Z_c=71,86%, что соответствует прогнозам, сделанным на основании квантово-химических расчетов.

Таблица 2

Результаты гравиметрических исследований противокоррозионной активности веществ I-V (С= 1ммоль/л) в растворе 0,1н HCl (Т=291К)

Вещество	Δm, г	K_m, г/(м^2/час)	Z_m, %
без вещества	0,09665	1,92683	–
I	0,09077	1,80961	6,08
II	0,05097	1,01615	47,26
III	0,01692	0,33732	82,49
IV	0,07385	1,47229	23,59
V	0,06568	1,30941	32,04

Защитный эффект вещества IV в 3,5 раза ниже, чем у вещества III, что определяется индукционным эффектом (I) заместителя в бензольном кольце веществ. Так как $–I_F > –I_{Cl}$, то реакционный центр (бензольное кольцо) вещества IV будет значительно обеднен электронной плотностью. Это приводит к ухудшению адсорбции IV на поверхности стали, и, как следствие, снижению защитной способности.

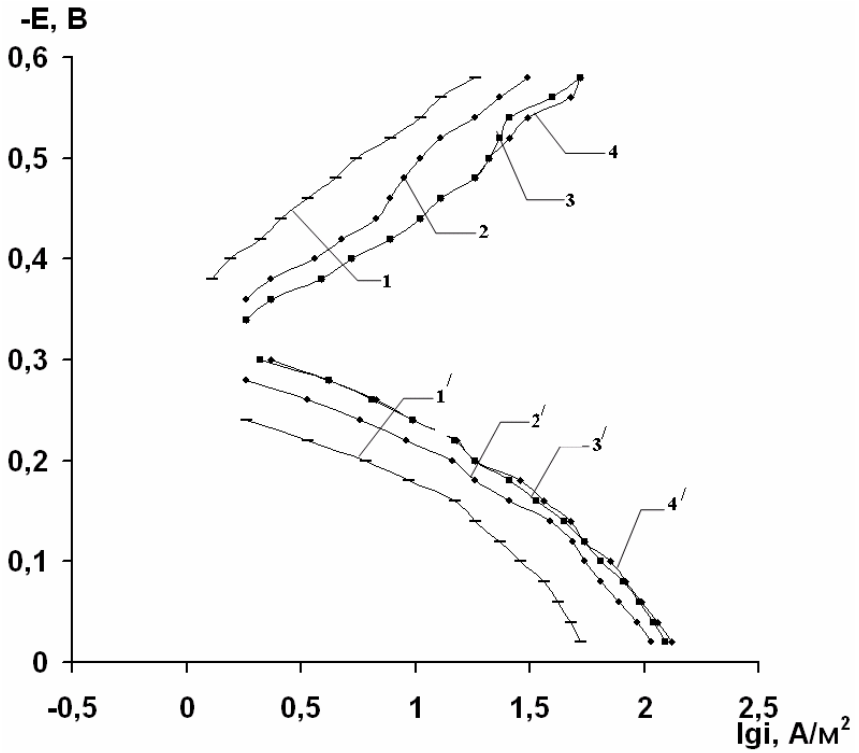
Для проведения электрохимических исследований были выбраны наиболее активные в 0,1н HCl соединения (табл. 3, рис. 1).

Таблица 3

Результаты электрохимических исследований противокоррозионной активности веществ II, III, V
(С= 1 ммоль/л) в растворе 0,1н HCl (Т=291К)

Вещество	I_a	γ_a	Z_a,%	$I_к$	$\gamma_к$	$Z_к$,%	I_c	γ_c	Z_c,%
Без вещества	21,38	–	–	7,76	–	–	2,63	–	–
III	5,89	3,63	72,45	1,82	4,26	76,55	0,74	3,55	71,86
II	13,8	1,55	35,45	3,89	1,99	49,87	1,51	1,74	42,58
V	21,38	1	–	7,76	1	–	2,63	1	–

Полученные данные позволяют сделать вывод, что соединения II и III – ингибиторы смешанного действия: катодного и анодного. Тогда как вещество V вообще не проявляет противокоррозионной эффективности как ингибитор электрохимической коррозии. Этим, по видимому, объясняется достаточно низкое значение степени защиты от общей коррозии Z_m= 32,04 %.



1,1′ –III; 2,2′ –II; 3,3′ – V; 4,4′ – без добавки

Рис. 1. Поляризационные катодные (1-4) и анодные (1′-4′) кривые стали 20 в 0,1н HCl с добавками исследуемых соединений

Увеличение молекулярной массы веществ, как правило, снижает их растворимость из-за стерических затруднений, особенно если в структуре веществ отсутствуют гидрофильные группы. Как и прогнозировалось, растворимость вещества III уменьшается с увеличением концентрации [15]. В свою очередь, не растворившиеся частички вещества III оседают на стали, увеличивая гетерогенность поверхности и, тем самым, усиливают электрохимическую коррозию. Например, при увеличении концентрации вещества III с 1 до 5 ммоль/л наблюдается снижение защитного эффекта Z_m в 2,2 раза (табл. 4).

Таблица 4

Результаты исследования зависимости противокоррозионной активности вещества III от концентрации в 0,1н HCl весовым методом (T=291K)

C, ммоль/л	Δm, г	K_m, г/(м^2/час)	Z_m, %
0	0,09665	1,92683	-
1	0,01692	0,33732	82,49
2	0,03387	0,67524	64,96
3	0,05565	1,10945	42,42
4	0,05948	1,18581	38,46
5	0,06068	1,20973	37,22

Вещество V, несмотря на большую молекулярную массу, хорошо растворимо в водных растворах кислот, так как содержит в своей структуре гидрофильные группы -OH и -NO_2. С увеличением концентрации вещества V с 1 до 5 ммоль/л проявляется ингибирующая эффективность при защите от электрохимической коррозии – коэффициент торможения электрохимической коррозии γ_c возрастает в 2,3 раза (табл. 5).

Таблица 5

Результаты электрохимических исследований зависимости противокоррозионной активности вещества V от концентрации в 0,1н HCl (T=298K)

C, ммоль/л	I_a	γ_a	Z_a,%	$I_к$	$\gamma_к$	$Z_к$,%	$I_с$	$\gamma_с$	$Z_с$,%
0	28,84	-	-	10,47	-	-	0,85	-	-
1	33,88	1,10	8,80	10,47	1,00	-	0,85	1,00	-
2	20,89	1,38	27,57	7,76	1,35	25,88	0,54	1,57	36,31
3	20,89	1,38	27,57	7,76	1.35	25,88	0,54	1.57	36.31
4	18,20	1,58	36,89	7,76	1.35	25,88	0,46	1,85	45,94
5	13,80	2,09	52,15	7,76	1,35	25,88	0,37	2,30	56,52

В растворе 0,1н H_2SO_4 защитный эффект вещества III снижается в 5,78 раз по сравнению с раствором 0,1н HCl, а вещества IV и V вообще не проявляют противокоррозионной активности в сульфатной среде (табл. 6).

Таблица 6

Результаты гравиметрических исследований противокоррозионной активности веществ III-V (C=1ммоль/л) в 0.1н H_2SO_4 (T=291K)

Вещество	Δm, г	K_m, г/(м^2/час)	Z_m, %
без вещества	0,21548	4,29585	–
III	0,18475	3,68321	14,26
IV	0,23620	4,70893	–
V	0,25815	5,14653	–

Потенциал нулевого заряда поверхности железа в сульфатном растворе более отрицателен, чем потенциал коррозии [16]. Положительный заряд на атоме N^1 веществ III – V [15] и обеднение электронной плотностью бензольных колец затрудняет адсорбцию III – V на поверхности стали из-за возникновения сил электростатического отталкивания с положительно заряженной в серной кислоте поверхностью стали, что и обуславливает низкое значение защитного эффекта или его отсутствие.

Выводы

Экспериментальные исследования подтвердили прогнозы, сделанные по результатам квантово-химических расчетов методом semi-empirical PM, что производные 3,4-дихлор-(2H)-пиридазин-3-она являются ингибиторами коррозии стали в 0,1н HCl. Как и предполагалось, вещество III показало более высокий защитный эффект, по сравнению с другими веществами исследованного ряда. Таким образом, проведение предварительных прогнозных расчетов противокоррозионной активности позволяет отобрать для дальнейших исследований только наиболее эффективные соединения, в результате существенно сокращается время и расход реактивов для проведения экспериментов.

Список использованных источников

1. Зв’язок між будовою гідразонів 2-гідразинобензімідазолу і їх ефективністю як інгібіторів корозії / О. І. Сиза, Л. Д. Косухіна, Л. Ю. Чумакова [та ін.] // Вісник Чернігів. технол. ін-ту. – 1996. – № 2. – С. 145-153.

2. Ингибирующее действие бромидов 1,2-диарил-5,6-дигидроимидазо [2,1-в] тиазолия на кислотную коррозию стали / О. И. Сизая, Л. Д. Косухина, В. А. Чумаков, А. М. Демченко // Журнал прикладной химии. – 1996. – Т. 69. – № 9. – С. 1501-1504.

3. Влияние строения производных 2-тиохиназолин-4-она на их противокоррозионную активность / О. И. Сизая, Л. Д. Косухина, Л. Ю. Чумакова, А. Н. Красовский // Защита металлов. – 1999. – Т. 35. – № 2. – С. 225-228.

4. Синтез и антикоррозионные свойства 1-алкиламино-3-(винилоксиэтокси) пропан-2-олов / Б. Ф. Кухарев, В. К. Станкевич, Г. Р. Клименко, Н. А. Лобанова, Е. Н. Ковалюк, А. Н. Баранов // Журнал прикладной химии. – 2000. – Т. 73. – Вып. 1. – С. 161-165.

5. Сизая О. И. Использование триазинов в противокоррозионной защите стали / О. И. Сизая, А. П. Андрушко // Защита металлов. – 2004. – Т. 40. – № 2. – С. 178-183.

6. Образцов В. Б. Ингибиторы кислотной коррозии стали: проблемы и перспективы / В. Б. Образцов, Ф. И. Данилов // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2004. – № 4. – С. 757-762.

7. Кузнецов Ю. И. Современное состояние теории ингибирования коррозии металлов / Ю. И. Кузнецов // Защита металлов. – 2002. – Т. 38. – № 2. – С. 122-131.

8. Гуменюк О. Л. Механізм протикорозійної дії N-, S-вмісних гетероциклічних сполук у кислих, нейтральних та лужних середовищах / О. Л. Гуменюк, О. І. Сиза, О. М. Красовський // Вісник Чернігів. держ. технол. ун-ту. – 2007. – № 30.– С. 91-98.

9. Ингибирование кислотной коррозии стали азотсодержащими органическими соединениями / Е. Ковалюк, Б. Кухарев, М. Маркина, Э. Брагин // Фізико-хімічна механіка метаріалів.– 2008.– Т.2. – Спец. вип. № 7. – С. 573-576.

10. Inhibition effects of methionin and tyrosine on corrosion of iron in HCl solution: electrochemical, ftir and quantum-chemical studu / S. Zor, F. Kandemirli, M. Bingal // Физикохимия поверхности и защита металлов. – 2009. – Т.45, № 1. – С. 50-57.

11. Влияние строения [1,3]тиазино[3,2-*a*]бензимидазол-4-онов на противокоррозионную защиту стали / В. Н. Челябиева, О. И. Сизая, С. В. Гаценко, О. Л. Гуменюк, А. Н. Есипенко, В. Н. Брицун // Физико-химия поверхности и защита металлов. – 2009. – Т. 45. – № 6. – С. 699-702.

12. Ингибирующее и биоцидное действие бромидов полиметиленимидазолиния / И. Н. Курмакова, С. В. Приходько, Н. В. Смыкун, А. П. Третяк // Защита металлов.– 2003. – Т.30. – № 4. – С. 399-402.

13. Многофункциональное действие [1,3]тиазино[3,2-a]бензимидазол-4-онов в противокоррозионной защите стали / В. Н.Челябиева, О. И. Сизая, С. В. Гаценко, А. Н. Есипенко, В. Н. Брицун // Защита металлов. – 2007. – Т. 43. – № 3. – С. 280-284.

14. Попов В. В. О вкладе электронной и стерической составляющей при количественной оценке защитной способности N-аналинпиридиниевых солей с помощью уравнений Тафта / В. В. Попов, Ю. Г. Скрыпник, С. Н. Лящук // Защита металлов. – 1999. – Т. 29. – № 2. – С. 310-312.

15. Гуменюк О. Л. Прогнозування впливу гербіцидних препаратів на корозійну стійкість металевих споруд і комунікацій / О. Л. Гуменюк, Ю. В. Квашук, В. А. Антоненко // Вісник Чернігів. держ. технол. ун-ту. – 2011. – №. 51. – С. 122-127.

16. Дамаскин Б. Б. Адсорбция органических соединений на электродах / Б. Б. Дамаскин, О. А. Петрий, В. В. Батраков. – М.: Наука, 1968. – 344 с.

УДК 674.038

П.Л. Ігнатенко, канд. техн. наук
Чернігівський державний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

ОСНОВНІ СПОСОБИ ВИЗНАЧЕННЯ ВОЛОГОСТІ У ДЕРЕВИНІ

Розглянуто основні способи визначення вологості у деревині, розраховано вологість як відношення маси вологи, що міститься у деревині, до її маси в абсолютно сухому стані.

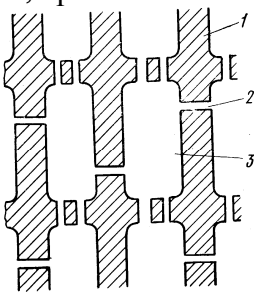
Вступ

Деревина складається з різноманітних рослинних кліток переважно подовженої форми. У деревині хвойних порід основним типом кліток є трахеїди, а листяних порід – волокна лібриформу і судини. Крім того, наявні клітки серцевинних променів і в невеликій кількості клітки деревної паренхіми.

Порожнини кліток, з'єднані між собою порами (рис. 1), утворюють у деревині макрокапілярну систему, що добре проникliва для рідин і газів у напрямку уздовж волокон і значно менше – поперек волокон.

Стінки кліток мають волокнисту будову. Вони формуються з окремих волоконець-мікрофібрил, орієнтованих уздовж осі чи клітки під невеликим кутом до неї. Мікрофібрили складаються з переплетених між собою ланцюгових молекул целюлози. Між мікрофібрилами розміщуються інші органічні речовини – геміцелюлози і лігнін, а також наявні вільні

сполучені простори, заповнені повітрям і вологою, кількість якої мінлива. Отже, у стінках кліток присутня своя капілярна система, проте більш тонка, чим макрокапілярна.



1 — стінка клітки, 2 — пора, 3 — порожнина клітки
Рис. 1. Схема макрокапілярної структури деревини

Вміст вологи в деревині, як і інших речовинах, характеризують величиною відношення маси вологи в деревині до маси деревини. Це відношення, виражене у відсотках, називають вологістю.

Постановка проблеми

У технології деревообробки прийнято розраховувати вологість як відношення маси вологи, що міститься в деревині, до її маси в абсолютно сухому стані [1]. Вологість W (у %) визначають у цьому випадку згідно з виразом:

$$W = \frac{m_{вол}}{m_{сух}} \cdot 100 = \frac{m - m_{сух}}{m_{сух}} \cdot 100, \quad (1)$$

де m – загальна маса проби, г;

$m_{сух}$ – маса проби в абсолютно сухому стані, г;

$m_{вол}$ – маса вологи в пробі, г.

Волога в деревині може знаходитися як у порожнинах кліток, заповнюючи макрокапілярну систему, так і в їхніх стінках. Вологу, що знаходиться в порожнинах кліток і в просторах між клітками, називають вільною, а в клітинних стінках – зв'язаною чи гігроскопічною.

Вміст зв'язаної вологи в деревині обмежений. Стан, при якому стінки кліток мають максимальну вологість при зіткненні їх з рідкою вологою, називається межею їхнього насичення. Вологість межі насичення ($W_{M.H}$) практично не залежить від породи і складає в середньому 30 %.

Методи і результати

Якщо вологість деревини більша $W_{M.H}$, тобто вище 30 %, значить у деревині міститься вільна волога. Максимальний вміст вільної вологи залежить від обсягу порожнин кліток і коливається для деревини різних порід від 60 до 250 %.

Деревина ростучого або свіжозрубленого дерева завжди має вологість вище вологості межі насичення, тобто вона є сирою.

Вологість свіжозрубленої деревини залежить від породи, місця розташування в стовбурі (ядро чи заболонь) і пори року. Вона коливається в дуже широких межах. Середні значення вологості свіжозрубленої деревини приведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Вологість свіжозрубленої деревини

Порода	Вологість, %		
	Ядра чи спілої деревини	заболоні	середня
Сосна, ялина	30-40	100-120	60-100
Модрина	40-50	100-120	50-70
Береза	-	70-90	70-90
Дуб	50-80	70-80	60-80

У хвойних порід вологість ядра і зрілої деревини значно нижче вологості заболоні. У листяних порід розходження у вологості по перетині стовбура практично не спостерігається [1].

Основні способи визначення вологості деревини.

Вологість деревини визначають різними способами. Найбільш розповсюдженими в деревообробці є ваговий і електричний способи.

Ваговий спосіб, правила визначення вологості якого регламентовані ГОСТ 16588–71, ґрунтується на зважуванні і висушуванні проб (зразків), що відбираються з контрольної партії деревних сортиментів. Від дошки або заготовки на віддалі 300-500 мм від торця випилюють поперечним перерізом пробу (рис. 2) розміром вздовж волокон близько 10 мм. Ця проба називається секцією вологості. Секцію ретельно зачищають від задирок, після чого негайно зважують на технічних терезах з точністю до 0,1 г. Отримане значення початкової маси реєструють у спеціальному журналі. Потім секцію поміщають у сушильну шафу і сушать при температурі $103 \pm 2°C$. Секцію періодично виймають із шафи і зважують, відмічаючи кожен раз у журналі результати зважування. Перше зважування виконують через 6 год, а наступні – через кожні 2 год. Секцію витримують у сушильній шафі доти, поки її вага не перестане змінюватися.

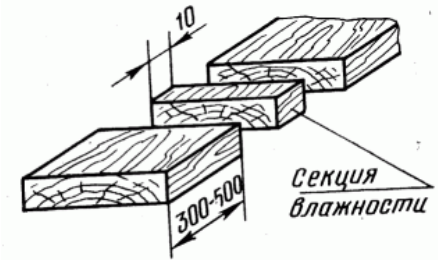


Рис. 2. Схема вирізки секції вологості з дошки

Постійну вагу приймають рівною її вазі в абсолютно сухому стані $m_{сух}$. Вологість (у %) розраховують згідно з рівнянням:

$$W = \frac{m_n - m_{сух}}{m_{сух}} \cdot 100. \qquad (2)$$

Для визначення вологості однієї дошки чи заготовки необхідно випилювати з них не менше двох секцій. Кількість контрольних дощок залежить від величини контрольної партії, а також необхідної точності і надійності контролю [3].

Електричний спосіб визначення вологості ґрунтується на залежності показників електричних властивостей деревини від її вологості. Для виміру вологості в цьому випадку використовують прилади, що називається електровологомірами. Широке поширення одержали кондуктометричні вологоміри, принцип дії яких заснований на залежності електричного опору деревини від її вологості. Особливість роботи цих електровологомірів полягає в тому, що вони досить надійно вимірюють вологість у діапазоні від 7 до 30 %. Вологість вище 30 % визначається з великою погрішністю.

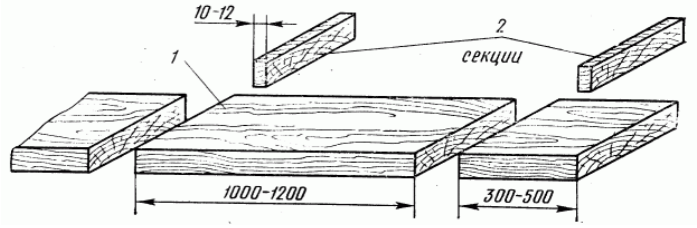
При сушінні пиломатеріалів використовують електровологоміри ЦНІІМОД-2; ЭВ8-100; ЭВА-2; ЭВА-2М; ЭВА-2ДО.

Датчик електровологоміра являє собою трьохголатий зонд, оснащений ручкою. При вимірюванні вологості голки датчика вводять у деревину на повну глибину в напрямку уздовж волокон. Елемент, який показує вимірювання пристрою, має шкалу, відградуйовану у відсотках вологості для деревини сосни при температурі 20° С. Якщо вимірюється вологість деревини інших порід і при іншій температурі, то в показання приладу вводяться поправки, значення яких наведені в таблицях, які додаються до електровологоміра.

Фактори, що впливають на результат вимірювання вологості за допомогою голчастого вимірювача:

- температура вимірюваного матеріалу (при збільшенні температури на 5°С вимірювач вологості показує приблизно на 0,5 % більш високий вміст вологи, найбільш точний результат виміру можна одержати при температурі матеріалу +20°С);
- температура навколишнього середовища;
- порода дерева, місце і швидкість росту (у сухій або болотистій місцевості, у північних або південних градусах широти, на галявині або в лісі);
- дійсна щільність деревини;
- випадкові смоляні гнізда в місці виміру, дефекти матеріалу;
- випадкова вологість на поверхні матеріалу;
- градієнт вологості наприкінці процесу сушіння (до вирівнюваннння матеріал біля поверхні сухіший, ніж у серцевині, наприклад, при виході із сушарки вологість поверхневого шару 50 мм дошки, висушеної до 8 % вологості, приблизно 6,5 % і в серцевині приблизно 11,5 %);
- взаємодія усіх вищезгаданих факторів.

Контроль вологості деревини в процесі сушіння проводять способом контрольних зразків. Контрольний зразок довжиною 1-1,2 м відпилюють від дошки, характерної для партії пиломатеріалів, що завантажується в сушильну камеру. Одночасно випилюють дві суміжні зі зразком секції вологості (рис.3). Відразу ж після розпилювання секції очищають від опилок і задирок та зважують на технічних вагах. Потім визначають їхню вологість [2]. Середнє значення вологості, обчислене по двох секціях, приймають за початкову вологість ($W_П$) контрольного зразка.



1 – контрольний зразок, 2– секції вологості
Рис. 3. Схема випилювання контрольного зразка

Контрольний зразок нумерують, торці його очищають і покривають густотертою олійною фарбою. Після цього зважують на торгових вагах з погрішністю до 5 г. Початкову масу *($M_П$)* записують на зразку й у журналі чи карті сушіння [3].

У кожен сушильний штабель закладають два-три контрольних зразки в місця інтенсивного й уповільненого сушіння.

Зразки укладають поруч з торцем штабеля чи трохи глибше, але так, щоб їх легко можна було вийняти. Вони повинні лежати на прокладках, не торкаючись площини дощок. Над зразками укладають спеціальні прокладки з вирізом (рис. 4).

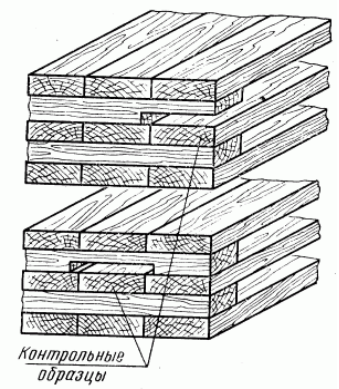


Рис. 4. Схеми розміщення контрольного зразка в штабелі

За відомими величинах початкової вологості і початкової маси розраховують масу абсолютно сухого контрольного зразка:

$$M_{СУХ} = \frac{M_П \cdot 100}{W_П + 100}. \quad (3)$$

Таким чином, його вага в абсолютно сухому стані відома перед початком сушіння.

У процесі сушіння через визначені проміжки часу зразки виймають зі штабеля і зважують. Поточну вологість W_T зразків знаходять за виразом:

$$W_T = \frac{M_T - M_{СУХ}}{M_{СУХ}} \cdot 100, \quad (4)$$

де M_T – *маса* зразка в момент визначення поточної вологості, г.

Висновки

При сушінні тонких пиломатеріалів хвойних порід контроль вологості проводять у початковій стадії процесу через 8 год, а в кінцевій – через 12 год. Для пиломатеріалів підвищеної товщини чи листяних порід проміжки часу між зважуваннями збільшують у 1,5-2 рази.

За величиною поточної вологості судять про можливість переходу на наступну ступінь режиму чи сушіння.

Спосіб контрольних зразків має ряд недоліків. Оператори повинні часто заходити у камери, що порушує в них режим сушіння. При цьому виникають незручності і навіть небезпека при застосуванні форсованих режимів. Для контролю вологості високотемпературного сушіння пиломатеріалів він непридатний. Крім того, цей спосіб не забезпечує високої точності вимірів.

Список використаних джерел

1. Богданов Е. С. Справочник по сушке древесины / Е. С. Богданов, В. А. Козлов, Н. Н. Пейч – М.: Лесн. пром-сть, 1981. – 191 с.

2. Кириченко В. Н. Охрана труда / В. Н. Кириченко. – М., 1990. – 118 с.

3. Кречетов И. В. Сушка и защита древесины / И. В. Кречетов. – М.: Лесн. пром-сть, 1987. – 372 с.

УДК 338.439.65

Т.М. Денисенко, канд. техн. наук
О.Б. Хребтань, ст. викладач
Чернігівський державний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

ТОВАРОЗНАВЧА ОЦІНКА ЯКОСТІ ТОМАТНИХ СОУСІВ, ЯКІ РЕАЛІЗУЮТЬСЯ В РОЗДРІБНІЙ ТОРГІВЕЛЬНІЙ МЕРЕЖІ М. ЧЕРНІГОВА

Досліджено органолептичні та фізико-хімічні показники якості томатних соусів вітчизняного виробництва, які реалізуються в роздрібних підприємствах м. Чернігова. За результатами проведених досліджень було встановлено, що томатні соуси одного виду, але вироблених різними вітчизняними виробниками, відрізнялися не тільки за органолептичними, але і за фізико-хімічними показниками. Отже, виникає необхідність у проведенні постійних дослідженнях якості продукції, яка з'являється у вітчизняних підприємствах торгівлі.

Постановка проблеми

Дослідження якості та безпеки харчових продуктів є першочерговим завданням вітчизняних товарознавців-експертів. Контроль органолептичних та фізико-хімічних показників якості продуктів є запорукою здоров'я та безпечного харчування населення. Особливо це стосується продовольчих товарів, до яких звикли споживачі, і виробників, яким покупці довіряють. Однак сьогодні актуальним є питання фальсифікації саме відомих торгових марок та харчових продуктів. Проведені нами дослідження спрямовані на визначення якості саме таких відомих продуктів, які користуються постійним попитом у споживачів – томатних соусів.

Томатні соуси відносяться до товарної групи – приправи. Вони мають у своєму складі поживні (томат-продукти, фруктові добавки) та смакові речовини. Застосовують соуси для покращання смаку кулінарних виробів, м'ясних, рибних та овочевих консервів. Основною сировиною для виробництва томатних соусів є: продукти томатні концентровані або свіжі томати, сіль, цукор, прянощі, оцтова кислота, рослинна олія тощо. В якості додаткової сировини використовують овочі свіжі та пюре з них, фруктове пюре, соки фруктові концентровані, зелень пряних рослин, екстракти прянощів, порошок гірчичний, воду, борошно, сорбінову та лимонну кислоти.

Томатні соуси виробляють концентровані та неконцентровані.

До концентрованих відносяться такі види томатних соусів: «Дністровський», «Гострий концентрований».

До неконцентрованих відносяться: «Апетитний», «Астраханський», «Грузинський», «Краснодарський», «Кубанський», «Молдова», «Гострий», «Херсонський», «Чорноморський», «Шашличний».

За способом обробки томатні соуси бувають нестерилізовані і стерилізовані та із застосуванням консерванту [1].

Розфасовують томатні соуси у скляні банки місткістю не більше 0,65 дм^3 з закупорюванням металевими лакованими кришками; в металеві лаковані банки місткістю не більше 0,5 дм^3; алюмінієві туби місткістю не більше 0,2 дм^3 та в комбіновані плівкові матеріали.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Дослідження якості продуктів на основі переробки томатів проводили такі відомі науковці, як Василинець Г.М., Герасимова В.А., Пономарьов П.Ф., Никифорова Н.С., Павлюченко Ю.П. та інші. Питанням якості та безпеки томатних соусів було присвячено не так багато досліджень і вони не мали системного характеру. Однак попит на приправи на основі томат-продуктів постійно високий, українські споживачі із задоволенням включають цю продукцію в раціон свого харчування.

Формулювання цілей статті

Метою статті було дослідження органолептичних та фізико-хімічних показників якості томатних соусів вітчизняного виробництва, які реалізуються в роздрібних підприємствах м. Чернігова.

Виклад основного матеріалу дослідження

Зразки томатних соусів вітчизняного виробництва були обрані нами на підставі вивчення попиту споживачів та аналізу продажів асортименту томатних соусів у роздрібних підприємствах м. Чернігова.

За результатами вивчення попиту споживачів було встановлено, що постійним попитом користувалися томатні соуси типу «Краснодарський», а лідерами продажу виявилися два виробники: ВАТ «Луцьк Фудз», торгова марка «Руна» та ПрАТ Херсонська обл., м. Каховка, торгова марка «Чумак».

Оцінювання якості починали з перевірки стану тари, герметичності укупорювання та повноцінності і доступності для споживача інформації на маркуванні. Перевірку маркування зразків томатних соусів проводили за ГОСТ 13799 [2].

Результати перевірки тари, герметичності упакування та правильності маркування зразків продукції наведені в таблиці 1 та зображені на рисунку 1.

Таблиця 1

Найменування показників якості	Фактичні показники зразків томатного соусу	
	Соуси Краснодарський фірмовий «Чумак»	Соуси Краснодарський фірмовий «Руна»
1	2	3
1. Стан тари	Скляна банка, без пошкоджень, сколів, повітряних пухирців із звичайного натрій-кальцій силікатного скла, безкольорова	

Продовження таблиці 1

1	2	3
2. Герметичність укупорювання	Металева лакована кришка щільно прилягала до горловини банки, не прокручувалася, не відставала від корпусу, без здуття, самоцільно не відкривалася. Захисне покриття кришки не пошкоджене, без ознак корозії. Підтікання соусу навколо кришки не помітно	
3. Стан маркування	Маркування нанесено на паперову етикетку. Етикетка має художнє оформлення, чиста, без пошкоджень та слідів клею	
4. Інформація на маркуванні	Інформація на маркуванні обох зразків відповідає вимогам ГОСТ 13799.	
	Інформацію надано двома мовами: українською та російською. Шрифт чорного кольору на білому фоні, допустимого за стандартом розміру	Інформацію надано українською мовою. Шрифт чорний на світло-зеленому фоні, розмір літер та цифр допустимий за стандартом
5. Склад соусу	Вода питна, томатна паста, цукор білий, загусник – крохмаль модифікований, яблучне пюре, сіль кухонна, регулятор кислотності – оцтова кислота, часник, перець духмяний, кориця, гвоздика, перець чорний, мускатний горіх	Вода питна, томатна паста, цукор білий, оцет столовий, пюре яблучне, загусник – крохмаль модифікований, сіль кухонна, прянощі (перець духмяний, гвоздика, мускатний горіх, перець чорний, кориця, часник), ароматизатор харчовий рідкий натурально-ідентичний «Садові трави», підсолоджувач – ацесульфам калію
6. Позначення стандарту	ТУ У 24106105.012-2000	ТУ У 15.8 – 00377163 – 011:2005

Рис. 1. Зовнішній вигляд досліджуваних зразків томатного соусу українських виробників

Ацесульфам калію (Acesulfame potassium, Acesulfame K) – E950 – штучний підсолоджувач з хімічною формулою $C_4H_4KNO_4S$, який не містить калорій. Являє собою білий кристалічний порошок. На думку дієтологів, підсолоджувач з індексами E950, E952 та E954 – шкідливі для печінки та нирок, а E951 – викликає головний біль.

Ароматизатор харчовий рідкий натурально-ідентичний «Садові трави» також являє собою сполуки хімічних речовин та впливає на органи кишково-шлункового тракту.

Досліджувані зразки томатних соусів були в стандартній скляній тарі, герметично закупорені, маркування відповідає вимогам стандарту.

Органолептичні та фізико-хімічні показники якості томатних соусів визначали за стандартними методиками ДСТУ 2118-93 [3].

Результати досліджень органолептичних показників томатних соусів представлені в таблиці 2.

Таблиця 2

Оцінка органолептичних показників якості досліджуваних зразків томатних соусів

Найменування показників	Показники за ДСТУ 2118-93	Фактичні показники томатних соусів	
		Соус Краснодарський фірмовий «Чумак»	Соус Краснодарський фірмовий «Руна»
Зовнішній вигляд	Однорідна протерта концентрована маса без наявності насіння, часток шкірки та інших грубих часток плодів. Допускається наявність дрібно-подрібнених часток овочів, зелені та прянощів	Однорідна протерта концентрована маса без наявності насіння, часток шкірки та інших грубих часток плодів. У масі відсутні частки овочів, зелені та прянощів	
Консистенція	Від напіврідкої до такої, яку можна намазати	Щільна консистенція, можна намазати	Напіврідка
Смак та запах	Кисло-солодкий, гострий, властивий концентрованій томатній масі із добре вираженим ароматом прянощів та овочів. Не допускається сторонній смак та запах	Властивий концентрованим томат-продуктам, чистий без стороннього присмаку. Добре відчутний запах кориці та гвоздики, без стороннього	Смак більш виражений кисло-солодкий. Добре відчутно смак яблучного пюре. Сторонні запахи відсутні
Колір	Червоний, оранжево-червоний та малиново-червоний, рівномірний по всій масі. Допускається коричнюватий відтінок	Червоний, чистий без відтінків	Червоно-оранжевий з жовтуватим відтінком

З даних таблиці 2 видно, що органолептичні показники якості обох зразків не мають відхилень від нормативних. Більш приємні смакові якості та зовнішній вигляд мав томатний соус «Чумак», у порівнянні з соусом «Руна».

З фізико-хімічних показників у зразках томатних соусів досліджували масову частку сухих речовин, кислотність, що титрується, та вміст сторонніх домішок.

Вміст сухих речовин (%) визначали за допомогою рефрактометру. Метод, яким користувалися, заснований на визначенні коефіцієнта заломлення речовини, за яким визначають характеристики речовини та її вміст у продукті. Кислотність, що титрується (%), визначали методом нейтралізації розчином лугу водних витяжок кислот та кислих солей, здобутих із зразків томатних соусів.

У таблиці 3 зведені результати фізико-хімічних досліджень томатних соусів.

Таблиця 3

Фізико-хімічні показники зразків томатних соусів

Найменування показників	Соус Краснодарський фірмовий «Чумак»		Соус Краснодарський фірмовий «Руна»	
	Нормативні показники за ТУ У 24106105.012-2000	Фактичні показники	Нормативні показники за ТУ У 15.8-00377163-011 : 2005	Фактичні показники
1. Масова частка розчинних сухих речовин, % не менше	Не менше 18	18	Не менше 14	16
2. Масова частка кислот, що титруються, у розрахунку на яблучну кислоту, %	0,6 – 1,5	1,0	1,1 – 1,5	1,5
3. Домішки рослинного походження	Не допускаються	Відсутні	Не допускаються	Відсутні
4. Сторонні домішки	Не допускаються	Відсутні	Не допускаються	Відсутні

Фізико-хімічні показники досліджуваних зразків томатних соусів, наведені в таблиці 3, були в межах нормативних показників згідно з ТУ підприємств-виробників.

Проведене нами опитування споживачів, які купували томатний соус, виявило, що переважна більшість обирає продукцію з меншим вмістом харчових добавок, з відомими покупцям інгредієнтами складу. Тому серед досліджуваних зразків томатних соусів більшим попитом користувався томатний соус Краснодарський фірмовий «Чумак».

Після проведення товарознавчої оцінки органолептичних та фізико-хімічних показників досліджуваних томатних соусів найкращі результати були також у томатного соусу Краснодарського фірмового «Чумак».

Висновки

1. Досліджувані зразки томатних соусів були в стандартній скляній тарі, герметично закупорені, маркування відповідало вимогам стандарту.

2. До складу соусу Краснодарського фірмового «Чумак» не входили харчові добавки, була зазначена тільки натуральна сировина. В соусі Краснодарському фірмовому «Руна» зазначалися харчові добавки: ацесульфам калію (Е950) – штучний підсолоджувач та ароматизатор харчовий рідкий натурально-ідентичний «Садові трави», що було відмічено споживачами як фактор, який негативно вплинув на їх вибір.

3. За зовнішнім видом та смаковими якостями томатний соус Краснодарський фірмовий «Чумак» виявився кращим у порівнянні з соусом «Руна».

4. Проведене опитування показало, що споживачі віддають перевагу тим томатним соусам, які мають найменший вміст харчових добавок.

Список використаних джерел

1. Справочник по приемке, реализации и хранению продовольственных товаров растительного происхождения / под общ. ред. В. Е. Мицыка. – К.: Техника, 1981. – С. 140-142.

2. ГОСТ 13799-81. Продукция плодовая, ягодная, овощная и грибная консервированная. Упаковка, маркировка, транспортирование и хранение. – Введ. 01-01-83. – М.: Изд-во стандартов, 1981.

3. ДСТУ 2118-93 (ГОСТ 17471 – 93). Консерви. Соуси томатні. Загальні технічні умови. – Введ. 01-01-94.

4. ТУ У 24106105.012-2000. Консерви. Соуси і приправи томатні.

5. ТУ У 15.8-00377163-011:2005. Консерви. Соуси. Технічні умови.

РОЗДІЛ ІІ. ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ МАШИНОБУДУВАННЯ І АВТОТРАНСПОРТУ

УДК 621.822.172:621.7.079

Д.Ю. Федориненко, канд. техн. наук
Чернігівський державний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

СТАТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕГУЛЬОВАНИХ ГІДРОСТАТИЧНИХ ОПОР З НЕІДЕАЛЬНОЮ ГЕОМЕТРІЄЮ СПРЯЖЕНИХ ПОВЕРХОНЬ

Запропоновані підходи до визначення статичних вихідних характеристик регульованих радіальних гідростатичних опор з геометричними відхиленнями опорних поверхонь. Визначено вплив експлуатаційних параметрів на характеристики несучої здатності, статичної жорсткості опор з неідеальною геометрією опорних поверхонь.

Постановка проблеми

Гідростатичне мащення опорних вузлів знаходить все більше застосування в металорізальних верстатах для прецизійної і високошвидкісної обробки, а також у важких і унікальних верстатах. Гідростатичні опори (ГСО) дозволяють одержувати точність і чистоту обробки, характеристики навантажень, вібростійкість і високу стійкість надтвердих ріжучих інструментів, які не можуть забезпечити інші типи опор ковзання і кочення.

Подальше вдосконалення технічних рішень щодо розробки шпиндельних вузлів на регульованих у процесі механічної обробки ГСО є актуальною науково-технічною проблемою машинобудування, вирішення якої дозволяє значно підвищити точність і продуктивність обробки на металорізальних верстатах.

Аналіз досліджень і публікацій

У роботі Коровчинського М.В. досліджено вплив основних відхилень поверхонь шипа і вкладиша від правильної геометричної форми на роботу підшипників ковзання [2]. Відзначено, що вихідні характеристики підшипників ковзання істотно залежать від геометрії спряжених поверхонь навіть при незначних відхиленнях функції зазору від гармонійної складової. Авторами наукової роботи Білоусовим Л.О. та Соломіним О.В. отримано просторову функцію розподілу тиску в підшипниках ковзання при впливі відхилень круглості, профілю поздовжнього перетину та ін. [2]. У роботі Білоусова О.І. та Хромова Т.О. розглянуто вплив основних похибок вала і втулки в поперечному та поздовжньому напрямках на несучу здатність, витрати рідини в ГСО при ламінарному режимі течії рідини [3].

Відзначені підходи до визначення вихідних характеристик ГСО ґрунтуються на визначені статичних характеристик опор за окремими геометричними відхиленнями спряжених опорних поверхонь підшипників без урахування технології їх виготовлення. Проте в реальних опорах геометричні відхилення, деформації опорних поверхонь у поперечному та поздовжньому напрямках наявні одночасно, що обумовлює доцільність аналізу вихідних характеристик підшипників з одночасним урахуванням впливу значної кількості похибок спряжених поверхонь.

Мета статті

Метою роботи є розробка математичної моделі для аналізу вихідних статичних характеристик радіальних регульованих шпиндельних ГСО з урахуванням впливу неідеальної геометрії спряжених поверхонь підшипника.

Виклад основного матеріалу

До основних експлуатаційних характеристик ГСО відносяться силові та моментні реакції, несуча здатність, витрата рідини, втрати потужності, статична та динамічна жорсткість, демпфувальна спроможність опор.

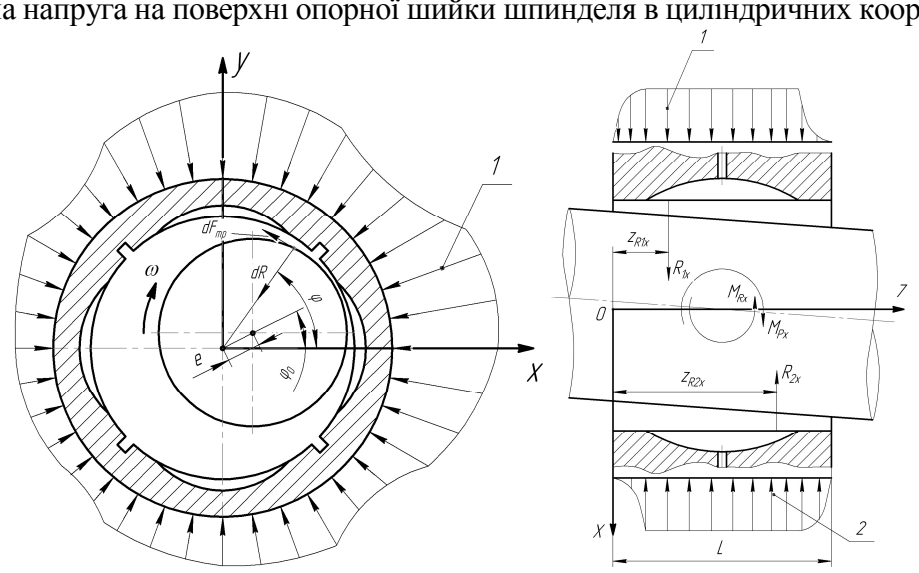
Реакцію F у ГСО шпинделя можна подати у вигляді двох складових: рівнодіючої сили гідростатичного тиску рідини R на опорну шийку та сили тертя $F_{тр}$ у мастильному шарі, що виникає при обертанні шпинделя (рис. 1, *а*). У проекціях на відповідні координатні осі запишемо:

$$F_x = R_x + F_{mpx};\ F_y = R_y + F_{mpy};$$

$$R_x = \frac{D}{2}\int_0^L\int_0^{2\pi} p(\varphi,z)\cos\varphi d\varphi dz;\ R_y = \frac{D}{2}\int_0^L\int_0^{2\pi} p(\varphi,z)\sin\varphi d\varphi dz; \quad (1)$$

$$F_{mpx} = \frac{D}{2}\int_0^L\int_0^{2\pi} \tau(\varphi,z)\sin\varphi d\varphi dz;\ F_{mpy} = \frac{D}{2}\int_0^L\int_0^{2\pi} \tau(\varphi,z)\cos\varphi d\varphi dz,$$

де *D*, *L* – діаметр та довжина опорної частини ГСО; *p(φ, z)* – функція розподілу тиску на опорній частині ГСО в циліндричних координатах (*φ* – полярний кут, *z* – апліката); *τ(φ, z)* – дотична напруга на поверхні опорної шийки шпинделя в циліндричних координатах.



а) *б)*

Рис. 1. До формування силової: а) та моментної; б) реакцій у радіальній ГСО: 1, 2 – епюри тиску на опорних поверхнях підшипника

При перекосі осі шпинделя у власних опорах виникає асиметрія епюр тиску, що обумовлює формування моментної складової реакції в підшипниках. Рівнодіючі сил тиску R_1, R_2 відносно центра підшипника з координатою z=L/2 призводять до формування момента M_R, що протидіє зовнішньому моментному навантаженню M_P.

Розглянемо формування моментної складової реакції в ГСО в площині XOZ (рис. 1, *б*). Рівнодіючі сили тиску R_{1x}, R_{2x} з урахуванням (1) запишуться у вигляді:

$$R_{1x} = \frac{D}{2}\int_0^{L/2}\int_0^{2\pi} p(\varphi,z)\cos\varphi d\varphi dz;\ R_{2x} = \frac{D}{2}\int_{L/2}^{L}\int_0^{2\pi} p(\varphi,z)\cos\varphi d\varphi dz.$$

Аплікати z_{R1x}, z_{R2x} точок прикладання рівнодіючих сил тиску можна визначити з умови рівності їх моментів відносно початку координат моментам елементарних сил тиску dp відносно точки О. З урахуванням вищесказаного отримаємо:

$$z_{R1x} = \frac{\frac{D}{2}\int_0^{L/2}\int_0^{2\pi} p(\varphi,z)\cos(\varphi)zd\varphi dz}{R_{1x}};\ z_{R2x} = \frac{\frac{D}{2}\int_{L/2}^{L}\int_0^{2\pi} p(\varphi,z)\cos(\varphi)zd\varphi dz}{R_{2x}}. \quad (2)$$

Тоді моментна реакція в опорі у площині XOZ обчислюється, як:

$$M_{Rx} = R_{1x}\left(\frac{L}{2} - z_{R1x}\right) + R_{2x}\left(z_{R2x} - \frac{L}{2}\right). \quad (3)$$

Аналогічним чином можна знайти складову моментної реакції в площині ZOY. Сумарна моментна реакція M_R та кут φ_{MR}, що визначає площину її прикладання, знайдуться у вигляді:

$$M_R = \sqrt{M_{Rx}^2 + M_{Ry}^2}\ ;\ \varphi_{MR} = arctg\frac{M_{Ry}}{M_{Rx}}.$$

Одними з основних критеріїв, що визначають якість ГСО, є несуча здатність та статична жорсткість. Основою для визначення зазначених критеріїв є просторова функція тиску $p(\varphi, z)$. Загальні підходи до визначення функції тиску $p(\varphi, z)$ в регульованих ГСО з урахуванням неідеальної геометрії спряжених поверхонь викладені в роботі [4]. У цій статті зосередимося на аналізі характеристик несучої здатності та статичної жорсткості, вважаючи просторову функцію тиску $p(\varphi, z)$ попередньо визначеною.

Як зазначається в роботі, основний вплив на несучу здатність чинить тиск рідини в карманах опор [4]. Впливом перепаду тиску на перемичках на несучу здатність можна знехтувати. Враховуючи граничні умови задачі, а саме: $p(\varphi, z) = 0$ на торцях підшипника та кромках дренажних канавок; $p(\varphi, z) = p_k$ у кармані ГСО, після подвійного інтегрування виразів (1) для реакцій R_x, R_y, отримаємо:

$$R_x = \frac{DL}{2}\sum_{i=1}^{n_k} p_{ki}\left(\sin\varphi_{\tau k2} - \sin\varphi_{\tau k1}\right);\ R_y = \frac{DL}{2}\sum_{i=1}^{n_k} p_{ki}\left(\cos\varphi_{\tau k1} - \cos\varphi_{\tau k2}\right), \quad (4)$$

де n_k – кількість карманів у тангенціальному напрямку ГСО; $\varphi_{\tau k1}$, $\varphi_{\tau k2}$ – кути кромок кармана, що визначають його положення в тангенціальному напрямку (за координатою φ).

У формулах (4) величину L слід покласти рівною довжині кармана в аксіальному напрямку підшипника.

Представимо параметри, що входять до рівнянь (4), в безрозмірному вигляді. Таке представлення дозволяє наочно порівняти порядок величин, скоротити загальну кількість параметрів математичної моделі.

Перейдемо до безрозмірних величин шляхом заміни:

$$R_x = \overline{R}_x\frac{DL}{2}p_H\ ;\ R_y = \overline{R}_y\frac{DL}{2}p_H\ , \quad (5)$$

де $\overline{R}_x, \overline{R}_y$ – безрозмірні реакції мастильного шару в ГСО за відповідними напрямками; p_H – тиск, створюваний насосною установкою.

З урахуванням (5) формули (4) набудуть вигляду:

$$\overline{R}_x = \sum_{i=1}^{n_k}\overline{p}_{ki}\left(\sin\varphi_{\tau k2} - \sin\varphi_{\tau k1}\right);\ \overline{R}_y = \sum_{i=1}^{n_k}\overline{p}_{ki}\left(\cos\varphi_{\tau k1} - \cos\varphi_{\tau k2}\right), \quad (6)$$

де $\overline{p}_{ki}$ – безрозмірна величина тиску в i-му кармані ГСО.

Безрозмірна несуча здатність $\overline{W}$ і кут її напрямку φ_w визначаються, як:

$$\overline{W} = \sqrt{\overline{R}_x^2 + \overline{R}_y^2}\ ;\ \varphi_w = arctg\frac{\overline{R}_y}{\overline{R}_x}. \quad (7)$$

Статична величина радіальної жорсткості підшипника визначається як похідна несучої здатності за абсолютним ексцентриситетам e шпинделя в опорі у вигляді [5]:

$$j = \frac{dW_{\varphi_0}}{de}, \quad (8)$$

де W_{φ_0} – проекція несучої здатності на напрямок дії вектора зовнішнього навантаження.

Перейдемо до безрозмірної величини жорсткості шляхом заміни:

$$j = \bar{j}\frac{DL}{2\delta_0}p_H\ , \quad (9)$$

де δ_0 – радіальний статичний зазор у ГСО.

З урахуванням виразів (5, 7–9) безрозмірна величина радіальної жорсткості ГСО набуде вигляду

$$\bar{j} = \frac{d\overline{W}_{\varphi_0}}{d\varepsilon}, \tag{10}$$

де ε – відносний ексцентриситет шпинделя в опорі, $\varepsilon = e/\delta_0$.

Оцінимо вплив геометричних відхилень поверхонь у тангенціальному напрямку на вихідні характеристики ГСО. Для цього випадку можна покласти, що функція динамічного зазору *h* не залежить від *z* (*h = f(φ)*). Тоді функцію зазору *h(φ)* з урахуванням неідеальної геометрії спряжених поверхонь підшипника можна представити у вигляді:

$$h(\varphi) = \delta_0 + \left[\begin{array}{l} A_1^в \sin\left(\varphi + \psi_{01}^в\right) + A_2^в \sin\left(2\varphi + \psi_{02}^в\right) + A_3^в \sin\left(3\varphi + \psi_{03}^в\right) + \\ A_4^в \sin\left(4\varphi + \psi_{04}^в\right) + A_5^в \sin\left(5\varphi + \psi_{05}^в\right) + A_6^в \sin\left(6\varphi + \psi_{06}^в\right) \end{array}\right] - \tag{11}$$
$$- \left[A_1^ш \sin\left(\varphi + \chi_{01}^ш\right) + A_2^ш \sin\left(2\varphi + \chi_{02}^ш\right)\right] + T_{кр}^{вт} + T_{кр}^ш,$$

де $A_1^в ... A_6^в$, $\psi_{01}^в ... \psi_{06}^в$ – амплітуди та початкові фази гармонік ряду відповідно, які характеризують відхилення гідростатичної втулки;

$A_1^ш ... A_2^ш$, $\chi_{01}^ш ... \chi_{02}^ш$ – амплітуди та початкові фази гармонік ряду відповідно, які характеризують відхилення опорної поверхні шпинделя;

$T_{кр}^{вт}$, $T_{кр}^ш$ – допуски круглості опорних поверхонь гідростатичної втулки та шпинделя відповідно.

Амплітуди $A_1^в ... A_6^в$ визначаються, як правило, експериментальним шляхом, значення яких для поширених конструкцій ГСО наводяться в роботі Соколова Ю.Н. та Гордєєва О.Ф. [6]. Амплітуда $A_1^ш$ являє собою абсолютний ексцентриситет *e* шпинделя в опорі. Значення $A_2^ш$ може бути знайдено, як: $A_2^ш = T_{кр}^ш / 2$. Допуски круглості у виразі (11) нормуються відповідними стандартами.

Функція радіального динамічного зазору *h(φ)* в підшипнику наведена на рис. 2 за умов: *e*=10 мкм, δ_0=40 мкм, кут положення, ексцентрично розташованого в опорі шпинделя, становить φ_0=75°, $T_{кр}^{вт}$=10 мкм, $T_{кр}^ш$=2 мкм, ексцентриситет контуру втулки відносно її геометричної осі $e_в$=5 мкм, кут положення контуру втулки $\varphi_в$=120°, $A^в$=(5; 3; 1,2; 0,8; 0,6; 0,5), $A^ш$=(10; 1), $\psi^в$=(π/2-120·π/180; 0; 0; 0; 0; 0), $\chi^ш$=(π/2-75·π/180; 0).

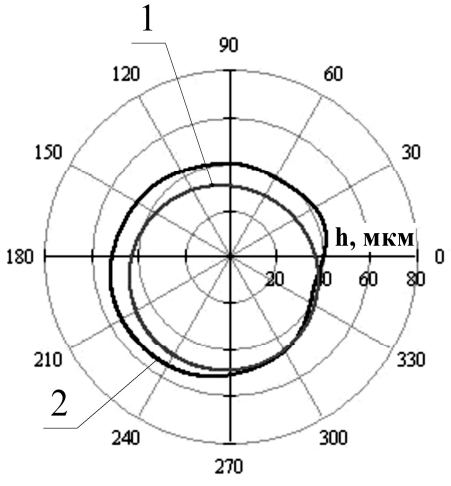
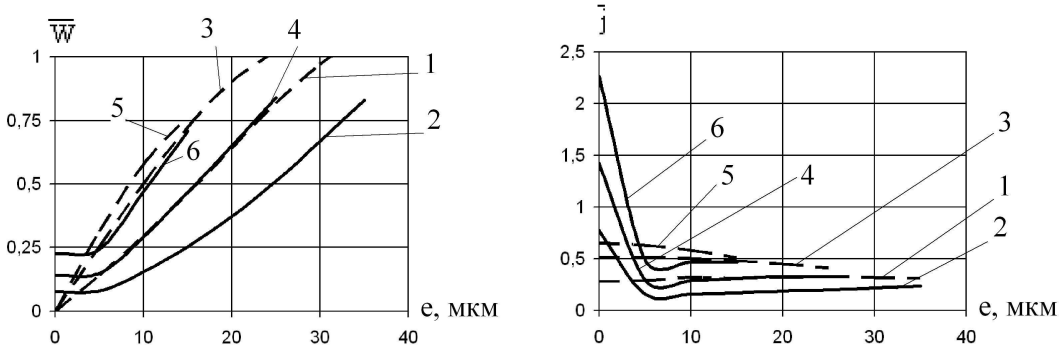


Рис. 2. Функція радіального динамічного зазору h(φ): 1 – циліндричні поверхні підшипника; 2 – з відхиленням форми спряжених поверхонь ГСП

На основі програмного середовища MathCAD за початкових умов ідентичних до графіка на рис. 2 обчислені залежності (6 – 7). З графіків на рис. 3, *а* видно, що зростання величин абсолютного ексцентриситету *е* в опорі приводить до відповідного збільшення величин несучої здатності $\overline{W}$, причому при менших значеннях регульованого зазору δ_0 зростання $\overline{W}$ відбувається інтенсивніше. Відмічене явище обумовлюється тим, що $\overline{W}$ зворотно пропорційна до величин δ_0^3.



а) *б)*

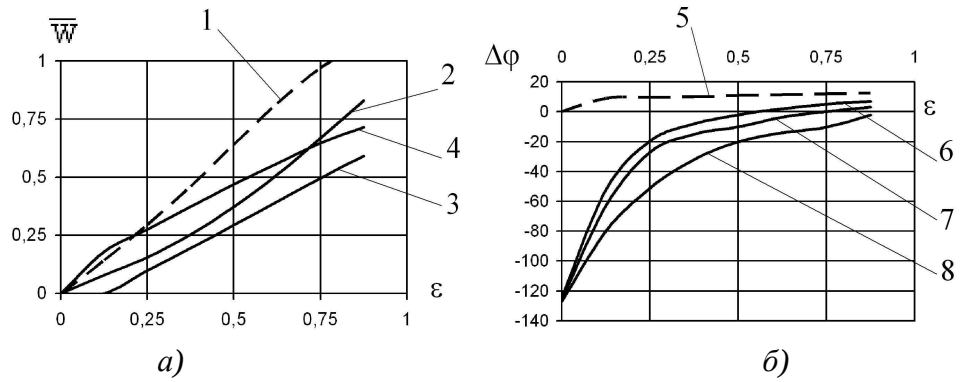
Рис. 3. Несуча здатність: а) та радіальна жорсткість; б) ГСО у функції абсолютного ексцентриситету (штрихові криві – ідеалізовані поверхні підшипника; суцільні криві – з відхиленням форми спряжених поверхонь): 1, 2 – δ_0=40 мкм; 3, 4 – δ_0=30 мкм; 5, 6 – δ_0=20 мкм

Встановлено, що врахування геометричних відхилень спряжених поверхонь підшипника призводить до зменшення розрахункових значень $\overline{W}$ у порівнянні з їх ідеалізованими поверхнями. Причому, зазначена відносна різниця значень $\Delta\overline{W}$ при регулюванні зазору δ_0 в бік зростання збільшується.

Слід відзначити, що підшипник з урахуванням неідеальної геометрії опорних поверхонь має ненульові значення $\overline{W}$ при *е*=0. Це пояснюється тим, що при обертанні шпинделя в ГСО з геометричними відхиленнями спряжених поверхонь виникає неврівноважена результуюча сила гідростатичного тиску рідини на опорну поверхню шпинделя. На практиці зазначена сила приводить до зміщення осі шпинделя від деякого центрального положення, причому останній здійснює обертання навколо центрального положення за певною траєкторією без прикладання зовнішнього навантаження. Зазначене явище спостерігається у верстатах при роботі шпиндельного вузла в режимі холостого ходу.

На рис. 3, *б* розрахунком за залежністю (10) отримані графіки безрозмірної радіальної жорсткості $\bar{j}$ в функції абсолютного ексцентриситету *е*. Радіальна жорсткість ГСО з ідеалізованими поверхнями дещо зменшується зі зростанням *е*, причому в області менших зазорів δ_0 цей процес відбувається інтенсивніше. При урахуванні неідеальної геометрії опорних поверхонь підшипника характеристика жорсткості стрімко спадає при *е*<5 мкм, що обумовлюється ненульовими значеннями $\overline{W}_{\varphi_0}$ при *е*=0. Регулювання зазору в ГСО в бік зменшення приводить до відповідного збільшення радіальної жорсткості у всьому діапазоні зовнішніх навантажень на шпиндель.

Встановлено, що несуча здатність для ідеалізованих поверхонь підшипника при ексцентричному положенні шпинделя не залежить від кута φ_0 прикладання зовнішнього навантаження (крива 1 на рис. 4, *а*). Проте для ГСП зі спряженими поверхнями, що мають геометричні відхилення, $\overline{W}$ набуває різних значень при зміні напрямку вектора зовнішнього навантаження (див. криві 2-4 на рис. 4, *а*). Зазначений вплив напрямку вектора зовнішнього навантаження на $\overline{W}$ пов'язаний з функцією зазору $h(\varphi)$ при урахуванні похибок опорних поверхонь ГСО.

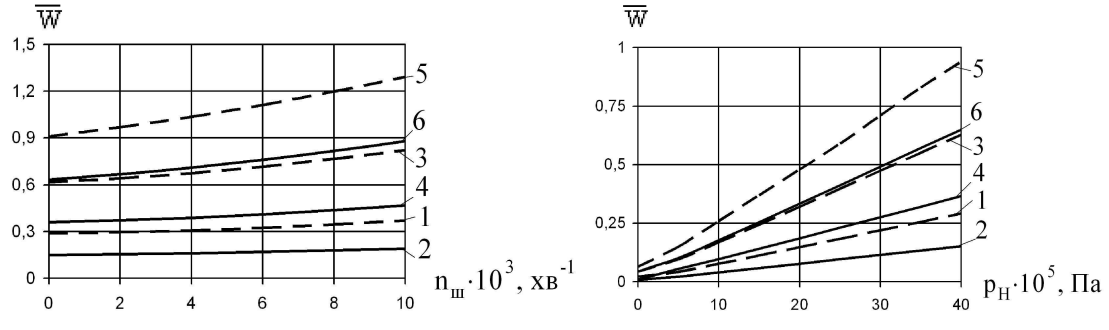


а) *б)*

Рис. 4. Вплив напрямку вектора зовнішнього навантаження: а) та кута $\Delta\varphi$; б) на несучу здатність при ексцентричному положенні шпинделя (штрихова крива – ідеалізовані поверхні підшипника; суцільні криві – з відхиленням форми спряжених поверхонь): 1, 2 – φ_0=75°; 3 – φ_0=120°, 4 – φ_0=300°; 5, 6 – δ_0=40 мкм; 7 – δ_0=30 мкм; 8 – δ_0=20 мкм

На рис. 4, *б* приведена залежність кута $\Delta\varphi$ (одиниця вимірювання – градуси) у функції відносного ексцентриситету ε шпинделя, що визначається, як: $\Delta\varphi=\varphi_w - \varphi_0$. Кут $\Delta\varphi$ певним чином характеризує нелінійні властивості мастильного шару в ГСО, завдяки яким лінії дії зовнішнього навантаження і несучої здатності не співпадають. Як видно з зазначеного рисунка, при зростанні зовнішнього навантаження (крива 1 на рис. 4, *б*), що визначається збільшенням значень ε, так і в процесі регулювання величиною зазору δ_0 для підшипника з ідеалізованими опорними поверхнями кут $\Delta\varphi$ мало змінюється. Зворотна картина спостерігається при урахуванні геометричних відхилень спряжених поверхонь підшипника (криві 2-4 на рис. 4, *б*), що, в цьому випадку, пояснюється впливом на напрямок вектора несучої здатності функції зазору $h(\varphi)$. Також встановлено, що зменшення зазору δ_0 приводить не тільки до збільшення величин $\overline{W}$, а й до зростання кута $\Delta\varphi$ між лінями дії навантаження і несучої здатності ГСО.

Як видно з графіків на рис. 5, несуча здатність $\overline{W}$ має практично лінійну залежність від частоти обертання шпинделя $n_ш$ та тиску насоса p_H, при збільшенні яких зростає. Для досліджуваного класу опорних вузлів ($n_ш \le 10000$ хв$^{-1}$) та в робочому діапазоні ексцентриситетів ($\varepsilon \le 0{,}5$) несуча здатність при зростанні робочих швидкостей шпинделя збільшується незначно в порівнянні з впливом тиску насоса, при якому за однакових умов значення $\overline{W}$ зростає в декілька разів. Це пояснюється тим, що несуча здатність, як видно з формул (5-7), пропорційна p_H.



а) *б)*

Рис. 5. Залежність несучої здатності ГСО від частоти обертання шпинделя $n_ш$: а) та тиску насоса p_H; б) при постійному опорі дроселів системи живлення (штрихові криві – ідеалізовані поверхні підшипника; суцільні криві – з відхиленням форми спряжених поверхонь): 1, 2 – ε=0,25; 3, 4 – ε=0,5; 5, 6 – ε=0,75

Висновки

Розроблено математичну модель для визначення безрозмірних характеристик несучої здатності, статичної величини радіальної жорсткості з урахуванням неідеальної геометрії спряжених поверхонь підшипника, яка є основою для оцінювання якості підшипників ковзання на етапі їх проектування.

Запропонована залежність функції радіального динамічного зазору у вигляді функціонального ряду з базисними тригонометричними функціями, що дозволяє описувати макро- і мікрогеометричні відхилення спряжених поверхонь підшипника та може бути використана для математичного моделювання ГСО широкої номенклатури.

При проектуванні шпиндельних ГСО доцільно враховувати похибки опорних поверхонь підшипника, оскільки ідеалізація відмічених поверхонь приводить при розрахунках до завищених показників несучої здатності та жорсткості, що, у свою чергу, негативно відбиватися на експлуатаційних показниках пари тертя і, як наслідок, на точності обробки різанням.

Список використаних джерел

1. Коровчинский М.В. Прикладная теория подшипников жидкостного трения / М. В. Коровчинский – М.: МиС, 1954. – 186 с.
2. Савин Л. А. Моделирование роторных систем с подшипниками жидкостного трения / Л. А. Савин, О. В. Соломин. – М.: Машиностроение-1, 2006. – 444 с.
3. Белоусов А. И. Влияние некоторых погрешностей форм вала и обоймы на характеристики гидростатического подшипника / А. И. Белоусов, Т. А. Хромова // Исследование гидростатических подшипников. – М., 1973. – С. 18-28.
4. Федориненко Д. Ю. До питання визначення функції тиску в шпиндельних гідростатичних опорах / Д. Ю. Федориненко // Вісник Чернігівського держ. технол. ун-ту. Серія “Технічні науки”. – 2011. – №1(47). – С. 16-23.
5. Детали и механизмы металлорежущих станков / В. В. Каминская, З. М. Левина [и др.]; под ред. Д. Н. Решетова. – М.: Машиностроение, 1972. – 519 с. – (Шпиндели и их опоры, механизмы и детали приводов; т. 2).
6. Соколов Ю. Н. Шпиндельные гидростатические подшипники. Расчет и проектирование / Ю. Н. Соколов, А. Ф. Гордеев. – М.: ЭНИМС, 1969. – 71 с.

УДК 621.9.06:621.941:621.9-112.5

В.М. Чуприна, канд. техн. наук
Чернігівський державний технологічний університет, м.Чернігів, Україна

ОПТИМІЗАЦІЯ ДИНАМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ КОМПЛЕКТНИХ ШПИНДЕЛЬНИХ ВУЗЛІВ В CAD-CAE СИСТЕМІ SOLIDWORKS/COSMOSWORKS

Розглянута актуальна проблема оптимізації динамічних показників комплектних шпиндельних вузлів при їх автоматизованому проектуванні. Дослідження проводились в CAD-CAE системі SolidWorks /CosmosWorks за методом кінцевих елементів. Приведені рекомендації щодо застосування цього методу для вибору раціональних компоновочних параметрів комплектних шпиндельних вузлів.

Вступ

Останнім часом у світі розповсюджується практика агрегатно-модульного комплектування металорізальних верстатів, у тому числі і комплектними шпиндельними вузлами, які виготовляються спеціалізованими підприємствами [1]. У більшості верстатів шпиндельні вузли визначають їх кінцеву якість, особливо динамічну [2]. Якість цих вузлів повинна забезпечуватися ще на стадії їх проектування. Тому задача оптимізації конструкції для вибору раціональних компоновочних параметрів шпиндельних вузлів є актуальною.

Вихідні характеристики конструкцій вузлів і верстата в цілому можна отримати як експериментальним, так і розрахунковим шляхом. На стадії проектування в САПР, коли ще матеріальна конструкція відсутня, застосовують розрахунковий метод [3]. Динамічний розрахунок є інформативним і дозволяє отримати дані про більшість вихідних показників, зокрема про статичну жорсткість, власні частоти коливань, форми коливань та інші параметри якості, а також дозволяє виявити "слабкі місця" розробленої конструкції. Крім того, розрахунковий шлях є також і найбільш економним, бо він не потребує виготовлення та випробування вузлів для оцінки якості майбутньої конструкції.

Серед багатьох методів і програм для динамічного розрахунку шпиндельних вузлів [4-8] найбільш сучасним є метод кінцевих елементів. Він дозволяє виконувати розрахунок і оптимізацію статичних і динамічних показників шпиндельних вузлів у САПР на основі їх кінцево-елементних математичних моделей. В якості кінцевих елементів можуть використовуватись одно-, двох- і трьохвимірні елементи. Однак найточніші розрахунки і наближеність результатів до параметрів реальних об'єктів дає використання параметричних 3D-моделей конструкцій.

CAD-CAE система SolidWorks/CosmosWorks широко використовується для автоматизованого проектування різних конструкцій, у тому числі верстатів і їх вузлів. Можливість оптимізації параметричних 3D-моделей об'єктів закладена в самій системі SolidWorks/CosmosWorks [9;10]. Проте її оптимізаційні можливості використовуються досить обмежено.

Мета статті

Метою статті є розробка методології оптимізації конструкцій шпиндельних вузлів за статичними і динамічними показниками для вибору раціональних компоновочних параметрів конструкції в сучасних CAD-CAE системах на основі параметричних 3D-моделей.

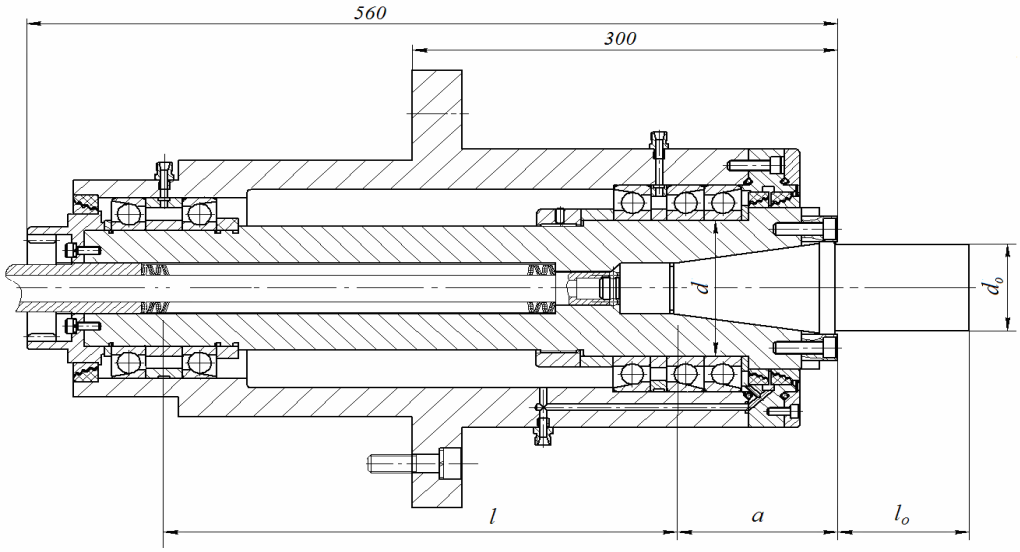
Виклад основного матеріалу

Оптимізація конструкції шпиндельного вузла проводилась на прикладі модіфікованих комплектних шпиндельних вузлів обробляючого центру ІР500ПМФ4. Для цього в CAD системі SolidWorks були розроблені параметричні 3D-моделі шпиндельних вузлів. Модифікація забезпечує більш широкий діапазон швидкостей обертання шпинделя – до 2500 об/хв у силовому варіанті (на роликових підшипниках) і до 4500 об/хв у швидкісному варіанті (на кулькових підшипниках). У цій роботі викристовувався другий варіант конструкції.

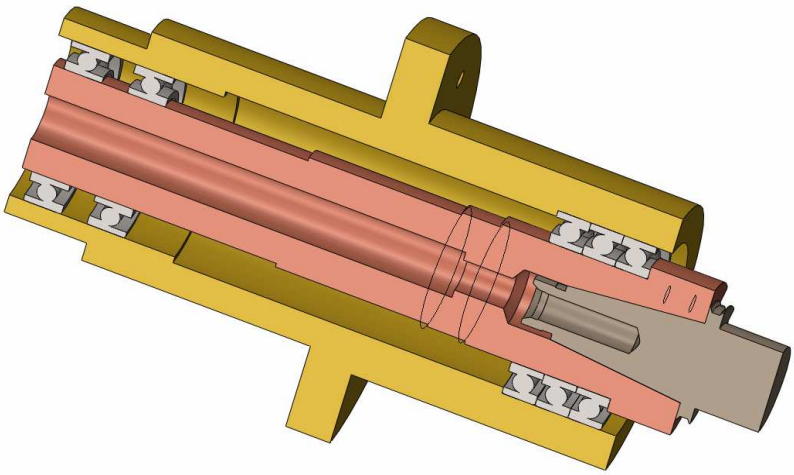
Схема комплектного шпиндельного вузла (швидкісної модифікації) і його спрощена параметрична 3D-модель (з короткою оправкою) показані на рисунку 1. Конструкція шпиндельного вузла має такі особливості. Шпиндель розміщено в корпусі на двох опорах, зібраних з кулькових радіально-упорних підшипників за схемами "триплекс" – в передній опорі і "дуплекс" – в задній. Вал шпинделя має внутрішній отвір, в якому розташовано механізм силового затиску різних інструментальних оправок (з кінематичним замиканням).

При побудові 3D-моделі шпиндельного вузла використовувались каталожні 3D-моделі піпшипників з бібліотеки Tools системи SolidWorks.

Параметризації підлягали розміри усіх деталей вузла, але при оптимізації враховувалися лише основні компоновочні розміри: діаметр у передній опорі d, відстань між опорами l, довжина консолі a та розміри оправок – довжина l_o та діаметр d_o.



а)



б)

а) складальне креслення; б) параметрична 3D-модель

Рис.1. Комплектний шпиндельний вузел (швидкісний варіант з короткою інструментальною оправкою)

Розрахунки статичних та динамічних показників комплектного шпиндельного вузла виконувалися в CAD-CAE системі SolidWorks у вбудованому додатку CosmosWorks за методом скінченних елементів.

Спочатку був проведений розрахунок базового варіанта конструкції. При розрахунках використовувались такі параметри:

довжина міжопорної відстані l=300 мм;

діаметр оправки d_o=70 мм;

довжина оправки l_o=200 мм (довгої) та 50 мм (короткої);

нагруження радиальою силою P=1000Н.

На рисунку 2 показана розрахункова модель комплектного шпиндельного вузла. В розрахунковій моделі базування і закріплення шпиндельного вузла виконувалось по фланцю корпусу, як і в реальній конструкції. Навантаження шпинделя забезпечувалось радиальною силою P=1000Н, прикладеною на консолі оправки в зоні різання.

Перед початком розрахунку виконувалось автоматичне розбиття усіх деталей збірної 3D-моделі комплектного шпиндельного вузла на об’ємні кінцеві елементи. При цьому автома-

тично будувалась відповідна мережа цих елементів. Метод побудови передбачає можливість завдання розмірів елементів генеруємої мережі в широких межах. Система дозволяє також будувати комбіновані мережі з різними розмірами елементів.

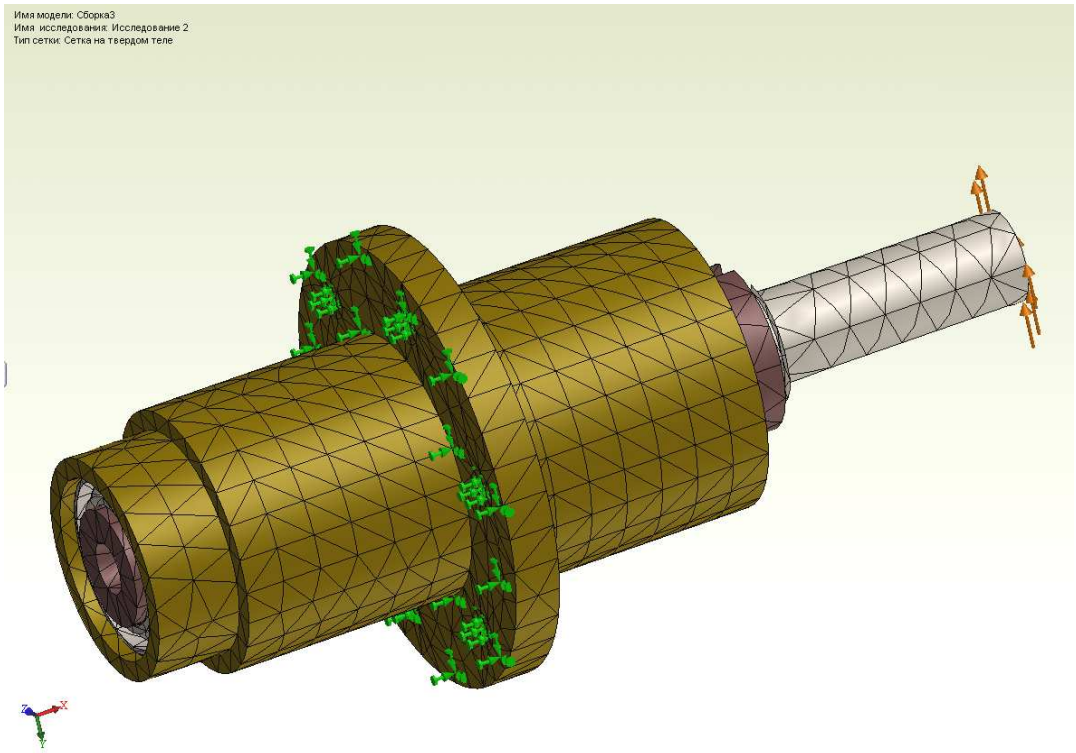


Рис.2. Розрахункова модель комплектного шпиндельного вузла з мережею кінцевих елементів (з довгою оправкою)

При розрахунках проводилося дослідження лінійної динаміки шпиндельного вузла при гармонічному навантаженні в широкому діапазоні частот (до 10000 Гц). Для кожного варіанта конструкції розраховувався ряд резонансних частот шпиндельного вузла (не менше 15 частот). Наприклад, для базового варіанта вузла він показаний на рисунку 3.

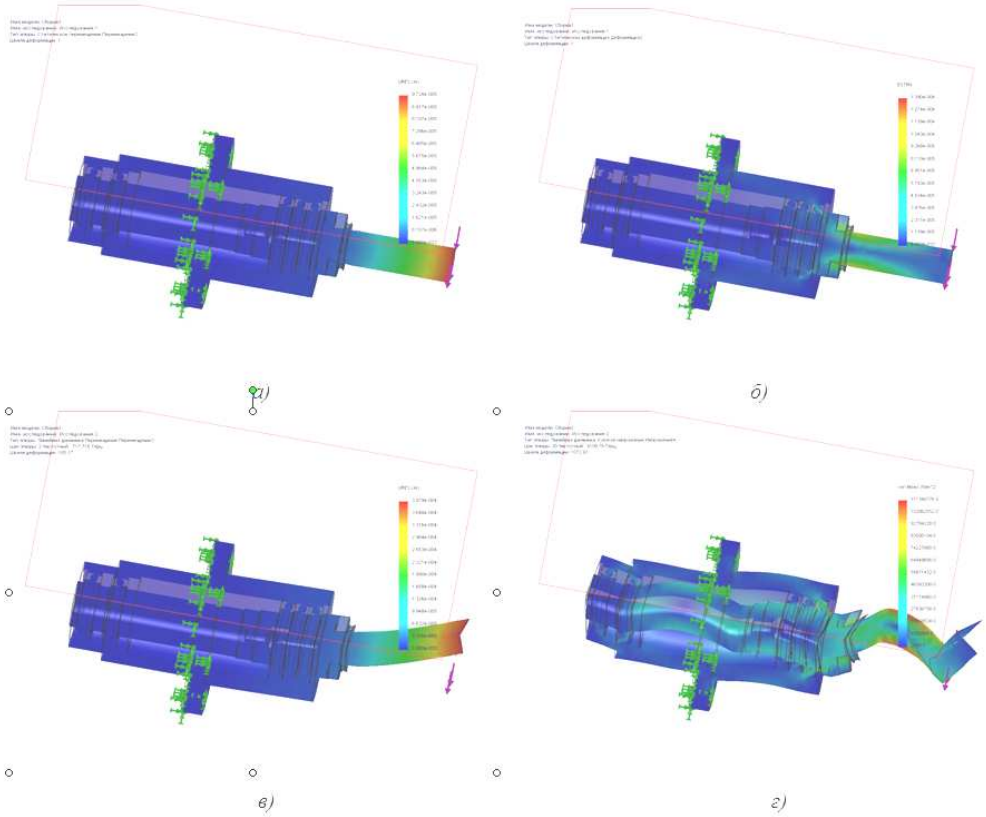
19:30, четверг, Март 10, 2011
Имя исследования: Исследование 2

Режим No.	Частотный(Рад/сек)	Частотный(Герц)	Период(Секунды)
1	5132.7	816.89	0.0012242
2	5327.2	847.86	0.0011794
3	9914.4	1577.9	0.00063374
4	9919	1578.7	0.00063345
5	10570	1682.3	0.00059441
6	10630	1691.8	0.00059107
7	17786	2830.7	0.00035327
8	17802	2833.3	0.00035295
9	18615	2962.7	0.00033753
10	19622	3123	0.00032021
11	22032	3506.4	0.00028519
12	23682	3769	0.00026532
13	26118	4156.8	0.00024057
14	26219	4172.9	0.00023964
15	28476	4532.1	0.00022065

Рис.3. Розрахунковий ряд резонансних частот (для базового варіанта з довгою оправкою)

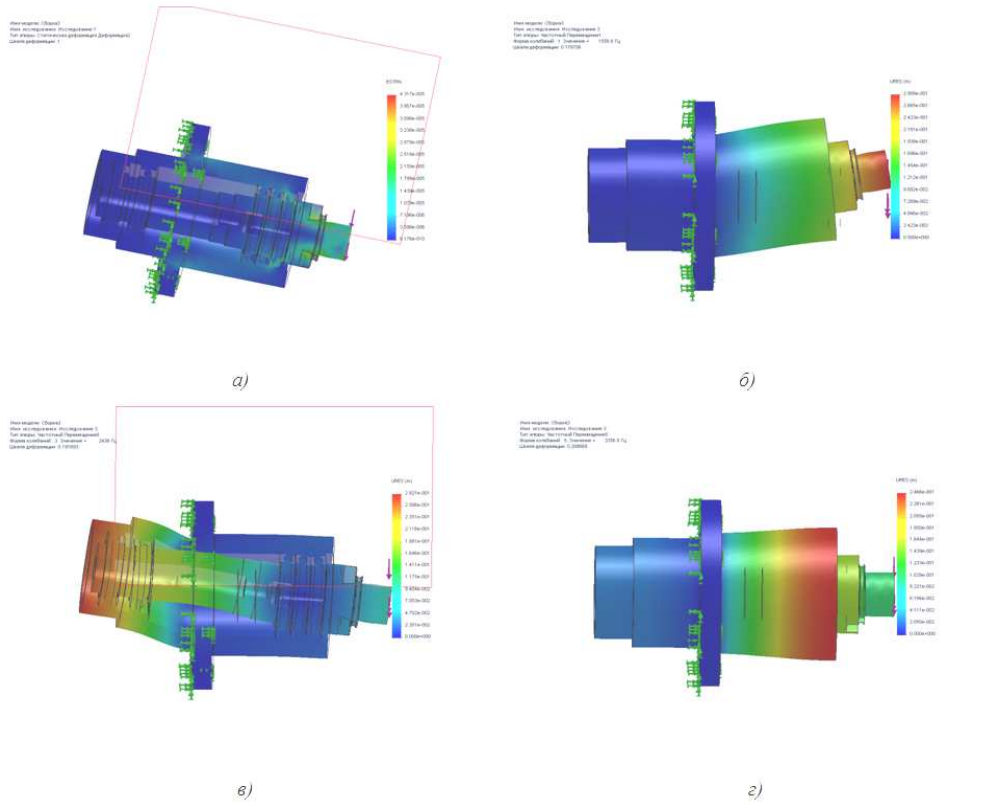
Крім того, розраховувались величини статичних напружень і деформацій конструкції, визначались значення частот власних коливань шпинделя, будувались картини форм коливань на основних резонансних частотах. У програмі Cosmos форми коливань будуються в збільшеному масштабі (для наочності результатів).

Вибіркові приклади результатів розрахунків для довгої оправки показані на рисунку 4, а для короткої – на рисунку 5.



а) статичне переміщення; б) статичне деформація;
в) форма коливань на частоті 817 Гц; г) форма коливань на частоті 4109 Гц

Рис.4. Результати розрахунків базового варіанта комплектного шпиндельного вузла (з довгою оправкою)



а) статична деформація; б) форма коливань на частоті 1558 Гц;
в) форма коливань на частоті 2438 Гц; г) форма коливань на частоті 3356 Гц

Рис.5. Результати розрахунків базового варіанта комплектного шпиндельного вузла (з короткою оправкою)

Система CosmosWorks дозволяє проводити оптимізацію як окремих деталей, так і збірних конструкцій. Оптимізація збірної 3D-моделі може виконуватись тільки шляхом змінення збірних розмірів, але при цьому не дозволяє змінювати розміри деталей. Тому для вирішення поставленої задачи оптимізації шпиндельного вузла за статичними та динамічними показниками в якості основного варіативного параметра використовувалась міжопорна відстань (відстань між серединами опор) *l*. Інші параметри практично не змінювалися (окрім параметрів оправок).

З метою забезпечення можливості розширення діапазону варіювання параметром *l* внесено зміни в конструкцію корпуса та шпинделя, які дозволяють розташовувати задню підшипникову опору вздовж практично усього шпинделя. Для цього довжина шпинделя і відповідно корпуса збільшена на 105 мм, причому передня опора закріплена жорстко, а задня переміщувалась по шпинделю вздовж корпуса на задану відстань (залежно від розміру *l*). Це дозволило при розрахунках змінювати розмір *l* в діапазоні від 200 мм до 400 мм.

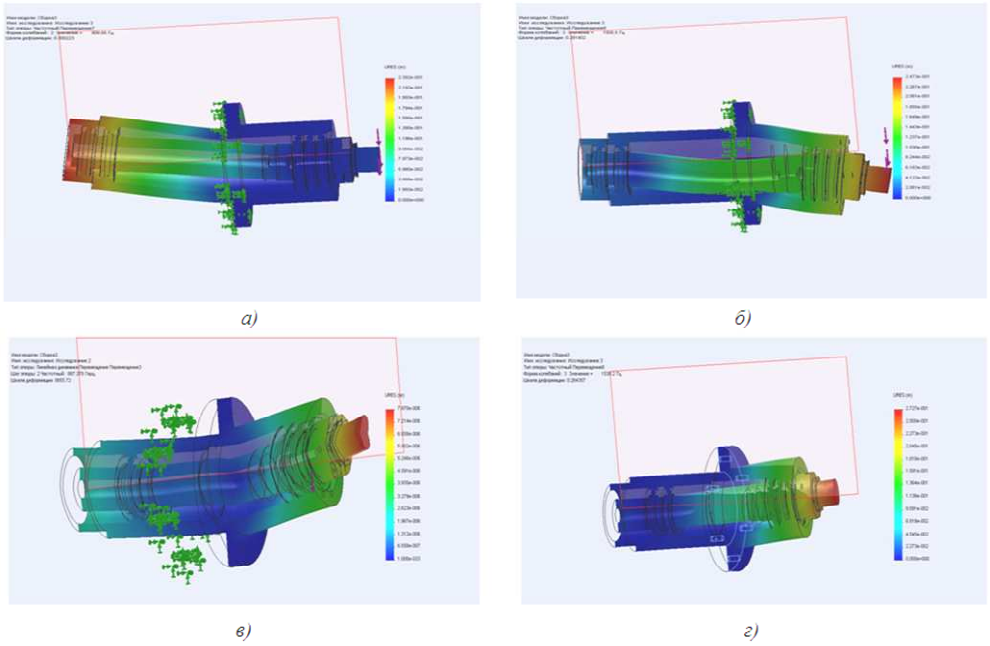
Для більш точного визначення оптимуму і можливості порівняння результатів оптимізація проводилась двома шляхами: як за автоматичним методом, вбудованим у програму Cosmos, так і вручну (на основі проведення серії розрахунків).

Однокритеріальна параметрична оптимізація в програмі CosmosWorks забезпечується шляхом пошуку екстремуму цільової функції при зміні варіативного параметра. Для цього програмі необхідно задати критерій оптимізації та діапазон змінення варіативного параметра. При статичній оптимізації в якості критерію було прийнято значення статичної жорсткості шпиндельного вузла, а при динамічній – першої власної частоти коливань шпинделя, яка визначається статичною жорсткістю конструкції (при незмінності її маси).

Оптимізація шпиндельного вузла проводилась поступово, в два етапи.

На першому етапі виконувалась наближена оптимізація для нової конструкції вузла (з подовженим корпусом). Варіативний параметр *l* змінювався на всьому можливому діапазоні від 200 мм до 400 мм (через 25 мм). При цьому знаходилась приблизна зона розташування оптимуму міжопорної відстані.

Для прикладу на рисунку 6 приведені картини форм коливань шпиндельного вузла з подовженим корпусом на резонансних частотах для різних значень міжопорної відстані.



а) при l=400 мм на частоті 908 Гц; *б) при l=375 мм на частоті 1505 Гц;*
в) при l=325 мм на частоті 887 Гц; *г) при l=300 мм на частоті 1538 Гц*

Рис.6. Форми коливань комплектного шпиндельного вузла з подовженим корпусом (коротка оправка)

На другому етапі проводилася уточнена оптимізація в значно звуженій зоні, але вже для базової конструкції (див. рисунки 4 і 5).

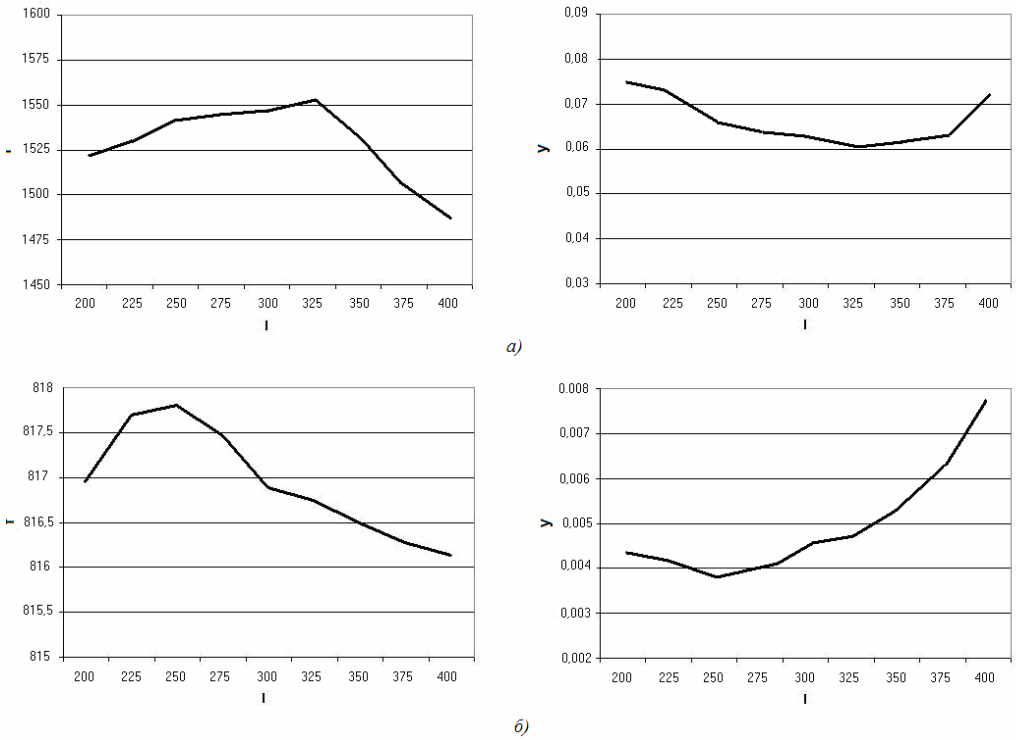
Оптимізація шпиндельного вузла виконувалась як для короткої (l_o=50 мм), так і для довгої (l_o =200 мм) оправки. Результати проведених досліджень зведені в таблицю 1, а побудовані на її основі графіки результатів статичної та динамічної оптимізації комплектних шпиндельних вузлів показані на рисунку 7.

Проведена серія дослідів з розрахунку статичних та динамічних показників комплектних шпиндельних вузлів при різних відстанях між опорами шпинделя (l=200…400 мм) дозволила знайти оптимальну міжопорну відстань. При використанні короткої оправки (l_o=50 мм) вона дорівнює $l_{опт}$=300 мм, при цьому перша резонансна частота шпиндельного вузла є найбільшою, тобто 1556,51 Гц. А при використанні довгої оправки (l_o=200 мм) вона становить $l_{опт}$=250 мм, при цьому перша резонансна частота дорівнює 817,80 Гц. Аналіз графіків показує, що статичні і динамічні оптимальні міжопорні відстані існують, але для різних довжин оправок вони не співпадають.

Таблиця 1

Результати проведених досліджень

№ п/п	***l***, мм	Коротка оправка l_o=50 мм		Довга оправка l_o=200 мм	
		y, мм	*f*, Гц	*y*, мм	*f*, Гц
1	200	0.004437	1521.14	0.075022	816.95
2	225	0.004204	1530.05	0.073617	817.69
3	250	0.003780	1542.22	0.066834	817.80
4	275	0.004103	1544.61	0.064819	817.46
5	300	0.004622	1547.17	0.063203	816.89
6	325	0.004716	1555.84	0.060748	816.74
7	350	0.005331	1531.77	0.062156	816.51
8	375	0.004437	1509.13	0.063812	816.28
9	400	0.004437	1487.21	0.072342	816.13



а) з короткою оправкою (l_o=50 мм); б) з довгою оправкою (l_o=200 мм)

Рис.7. Залежності першої резонансної частоти f(Гц) та статичної деформації оправки y(мм) від міжопорної відстані l (для базового варіанта комплектного шпиндельного вузла)

Для перевірки коректності результатів ручної оптимізації була проведена автоматична оптимізація міжопорної відстані за допомогою вбудованих засобів системи CosmosWorks. При цьому зберігалися усі умови проведення розрахунків, як і в попередніх експериментах (діапазони варіювання, параметри оправок та інше). В результаті отримали такі значення для різних довжин оправок: для l_o=200 мм оптимальна міжопорна відстань становить 240 мм, а для оправки l_o=50 мм – 317 мм.

Таким чином, можна констатувати, що результати автоматичної і ручної оптимізації практично збігаються.

Проведені дослідження показали, що технологічні вимоги обробки суттєво впливають на зміни статичних і динамічних характеристик комплектних шпиндельних вузлів. Користуючись результатами досліджень, можна вибрати раціональні конструктивні параметри шпиндельного вузла залежно від призначення металорізального верстата. Зокрема, для швидкісних шпиндельних вузлів обробляючого центру ІР500ПМФ4, що працюють переважно з довгими оправками, краще використовувати конструкцію з міжопорною відстанню в межах 240-260 мм. Для верстатів, що працюють з оправками малої довжини, раціональна міжопорна відстань лежить у межах 300-325 мм.

Висновки

Розроблена методологія оптимізації конструкцій шпиндельних вузлів за статичними і динамічними показниками забезпечує вибір раціональних компоновочних параметрів конструкції на основі оптимізації їх параметричних 3D-моделей.

Оптимізаційні параметри залежать від призначення металорізального верстата, зокрема від виду використовуваного основного і допоміжного інструмента (інструментальних оправок). При цьому зі зміненням відстані між опорами шпинделя податливість (статична і динамічна) шпиндельного вузла спочатку зменшується, а потім зростає. Тобто, існує оптимальне значення, яке для різних видів оправок може суттєво відрізнятись. Тому оптимізація компоновочних параметрів шпиндельних вузлів становить важливу задачу для виробників верстатів.

Дослідженнями доведено, що засоби системи SolidWorks з вбудованим пакетом CosmosWorks дозволяють не тільки виконувати автоматизоване проектування комплектних шпиндельних вузлів і інших виробів, але й проводити раціональний вибір їх конструктивних параметрів за статичними чи динамічними критеріями оптимізації ще на стадії проектних розробок у САПР.

Список використаних джерел

1. Аверьянов О. И. Модульный принцип построения станков с ЧПУ / О. И. Аверьянов. – М.: Машиностроение, 1987. – 229 с.
2. Кудинов В. А. Динамика станков / В. А. Кудинов – М.: Машиностроение, 1967. – 360 с.
3. Норенков И. П. Основы теории и проектирования САПР: учебник для вузов / И. П. Норенков, В. Б. Маничев – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. – 430 с.
4. Кудинов В. А. Автоколебания при низких и высоких частотах (устойчивость движений) при резании / В. А. Кудинов // Станки и инструмент. – 1997. – № 2. – С. 16-22.
5. Кудинов В.А. Поузловой анализ динамических характеристик упругой системы станка / Кудинов В.А., Чуприна В.М. – М.: Станки и инструмент, 1989. – № 11. – С.8-11.
6. Чуприна В. М. Порівняльний розрахунок динамічних характеристик шпиндельного вузла верстату 16К20Ф3 в САПР / В. М. Чуприна, М. А. Дмитренко, С. В. Лоскутов // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. – Чернігів: ЧДТУ, 2009. – № 37. – С. 105-116.
7. Левина З. М. Расчет статических и динамических характеристик шпиндельных узлов методом конечных элементов / З. М. Левина, И. А. Зверев // Станки и инструмент. – М.: Машиностроение,1986. – № 3. – С.6-9.
8. Чернянский П. М. Оптимальное проектирование шпиндельных узлов с увеличением числа подшипников в опорах / П. М. Чернянский, В. В. Шабанов // Технология металлов. – М.: ООО "Наука и технологии", 2007. – № 5. – С. 38-42.
9. Алямовский А. А. SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А. А. Алямовский – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 800 с.
10. Lombard M. SolidWorks 2007. Bible – Wiley Publiation inc., 2007. – 1074 с.

УДК 621.923.42

А.В. Рудик, канд. техн. наук
В.А. Рудик, студент
Чернігівський державний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

ВИЗНАЧЕННЯ ГРАНИЧНОЇ ТОВЩИНИ ЗРІЗУ, ЩО ЗАБЕЗПЕЧУЄ ЕФЕКТИВНЕ ШЛІФУВАННЯ

Розглядаються питання підвищення ефективності шліфування за рахунок використання різальної здатності абразивного інструмента до граничного рівня. Пропонуються математичні моделі впливу товщини зрізу на стійкість круга та величину його зносу.

Вступ

Метою продуктивного шліфування є завантаження абразивного інструменту до граничного рівня, що визначається різальною здатністю, для більших розмірів границь його контакту з деталлю.

Деякі вчені вважають [0; 10], що гранична товщина зрізу $(a_z)_{max}$ визначає різальну здатність та залежить від багатьох факторів, серед яких матеріали заготовки, абразивних зерен, зв'язки; кінематичні фактори, вібрації та стан робочої поверхні круга, який може працювати в режимах самозаточування та затуплення та інші. Природа зношення зерен та зв'язки для різноманітних умов може бути різною.

Таким чином, високоефективне шліфування – це складна проблема, яка поки що не має остаточного рішення. Нею займався ряд учених: Маслов Є.М., Корчак С.М., Філімонов Л.М., Кальченко В.В. та інші [2; 3; 5; 10]. Рішення її дозволить підвищити продуктивність обробки матеріалів, або зменшити знос інструментів.

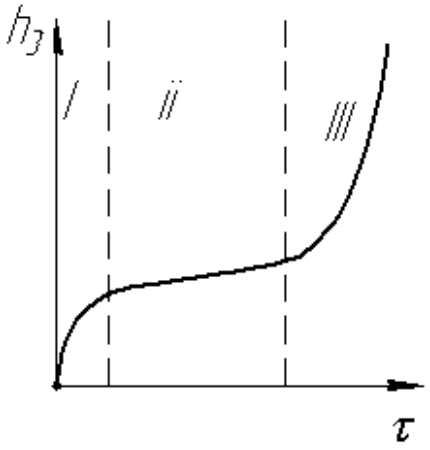


Рис. 1. Залежність зношення від часу роботи

Аналіз досліджень і публікацій

Очевидно цю проблему необхідно вирішувати з використанням статистичних методів побудови моделі процесу.

Відома загальноприйнята залежність, що характеризує процес зношення h_3, який відбувається за часом τ [1]. Вона може бути проілюстрована графічно (рис.1) та має три характерні ділянки, які описують час припрацювання, періоди сталого та критичного зношень.

У багатьох наукових працях першу й останню ділянки не враховують. Тоді цю залежність розглядають як лінійну. Такий підхід характерний, наприклад, для випадків зношення спряжень верстатів, автомобілів та інших машин.

$$h = C_h \cdot p^m \cdot L, \tag{1}$$

де p – питомий тиск у зоні тертя; L – шлях; C_h, m – емпіричні коефіцієнти.

При різанні металів лезовим інструментом використовують подібну залежність, що не однократно перевірялася багатьма авторами [1] та використовувалася як фундаментальна при визначенні режимів різання. В ній апроксимують лише перші дві ділянки, останню, третю не враховують, називаючи її зоною критичного зношення. Залежність описує зношення, що відбувається за часом τ, при врахуванні швидкості різання та заданих фізичних параметрах процесу:

$$h = C_h \cdot \tau^{\alpha} \cdot v_к^{\beta} \cdot a^{\gamma} \cdot b^{\varepsilon}, \tag{2}$$

де a,b – товщина та ширина зрізу; $v_к$ – швидкість різання, м/с.

Коефіцієнти визначають експериментально.

Широкому використанню подібного виразу для умов обробки шліфуванням перешкоджає відсутність загальноприйнятної моделі для визначення розподілення товщини зрізів та їх граничного значення і зв'язок між товщиною та шириною зрізу.

Залежність (2) дозволяє зробити наступний висновок. Якщо прийняти час таким, що дорівнює періоду стійкості інструмента, то зношення буде приймати граничне значення. Звідси відома залежність про зв'язок між стійкістю та швидкістю різання.

З неї можна визначити граничне значення товщини зрізу кромкою зерна під час шліфування для даної швидкості та стійкості при врахуванні зв'язку між товщиною та шириною зрізу:

$$a = \frac{C_a}{T^{\alpha/\gamma} \cdot v_к^{\beta/\gamma}} = \frac{C_a}{T^m \cdot v_к^q}. \quad (3)$$

Помітимо, що при збільшенні швидкості різання гранична товщина зрізу при заданій стійкості круга зменшується. В даний вираз не включена ширина зрізу кромкою *b*, бо вона визначається його товщиною.

Історично однією з перших була отримана залежність для традиційних на той час швидкостей різання $v_к$ до 40 м/с у роботі Маслова Є.М. [5] для визначення стійкості круга:

$$T = \frac{1{,}83 \cdot 10^{-5} \cdot v_к^{1,2} \cdot D^{0,93} \cdot d^{0,67} \cdot h^{0,27}}{v^{1,33} \cdot t^{1,6} \cdot s^{0,84}}, \quad (4)$$

де *v* – кругова подача деталі, м/хв; *t, h* – глибина та ширина (мм/хід) шліфування; *s* – поздовжня подача, мм/об; *D, d* – діаметри круга і деталі.

З цієї залежності видно, що зі збільшенням швидкості різання стійкість також підвищується, але її зростання відстає.

Подібні ж залежності, що наведені також у книзі Є. М. Маслової для інших умов обробки, мають вигляд:

$$T = \frac{C_\tau}{v^2 \cdot s^2 \cdot t^{1,2}}, \quad (5)$$

$$h_з = C_h \cdot v_к^{1.7} \cdot s^{1.7} \cdot t^{1.6}, \quad (6)$$

де $h_З$ – величина зношення круга.

У роботі [3] проф. Корчак С.М. пропонував враховувати при зношенні інструмента вплив параметрів зрізу, зміну радіального зусилля та зменшення опору металу при високих температурах та швидкостях деформації, характерних для шліфування.

Кінематичні параметри впливають на питому продуктивність обробки. За прийнятими уявленнями, приведеними у роботі Філімонова [10], на інтенсивність зношування впливає питома швидкість підведення металу:

$$Q_a = C_q \cdot Q^n. \quad (7)$$

В цій залежності коефіцієнти C_q ,*n* визначають дослідним шляхом. Перший відповідає об'єму зношеного круга при питомій продуктивності підведення матеріалу рівній одиниці. Значення коефіцієнта *n* має тенденцію до зменшення при збільшенні швидкості шліфування. Так, при обробці сталі 45 в діапазоні швидкостей 35-100 м/хв цей коефіцієнт зменшується з 1,8 до 1,5.

Тобто при збільшенні швидкості різання величина об'ємного зношення зменшується.

Відомо, що питому продуктивність шліфування *Q* вважають пропорційною глибині та круговій подачі, вплив яких на неї є однаковим. Відповідно, збільшення цих режимних показників впливає на об'єм зношеного абразиву, який зворотно-пропорційний до стійкості абразивного інструменту.

Залежність стійкості круга від швидкості різання та інших технологічних факторів була отримана в експериментальному науково-дослідному інституті металорізальних верстатів (ЕНДІМВ, Москва) при круглому зовнішньому урізному шліфуванні сталі 40Х (HRC 50-52) в діапазоні швидкостей 20-60 м/с [10]:

$$T = \frac{180 \cdot v_к^{2.3} \cdot d}{v^{2.64} \cdot t^{1.81} \cdot h^{1.1}}, \quad (8)$$

де t, h – глибина та ширина шліфування мм/об; d – діаметр деталі.

Помітимо подібність характеру залежностей (4) та (8), але ці вирази мають значне розходження показників ступенів та більший вплив кругової подачі порівняно до швидкості різання $v_к$.

Практикою доведено [3; 4; 10], що збільшення швидкості різання до 100 м/с призводить до суттєвого збільшення стійкості, особливо в області інтенсивних режимів шліфування (при продуктивності зняття металу більшій ніж 10 см^3/хв). Але це можливо лише при застосуванні жорстких верстатів. Вібрації негативно впливають як на якість обробки, так і зменшують стійкість, нерівномірно завантажуючи різні зерна робочої поверхні круга.

За даними роботи фірми Гюрінг (Німеччина) [10], збільшення швидкості різання в три рази, з 30 до 90 м/с дозволяє збільшити стійкість інструмента при круглому шліфуванні нормалізованої сталі 45 кругом типу 24А16СМ27К в десятки разів, а питомі витрати його зменшити в п’ять-десять разів. Критерієм стійкості була прийнята визначена ступінь зношення крайніх кромок робочої поверхні круга. Використовуючи наведені дані, показник ступеня у вказаному діапазоні швидкостей різання можна вважати близьким до залежності виду (8).

Однак при круглому поздовжному шліфуванні поверхонь на ділянках, прилеглих до торця круга, утворюється забірний конус, який зменшує товщину зрізу та перерозподіляє навантаження по висоті. Тому, дослідження товщини для круглого поздовжного шліфування не забезпечать точних результатів. Це було доведено в роботі [8].

Метод визначення граничної швидкості зняття металу для сталі 45, використаний у роботі Гюрінга для урізного шліфування з прискореною швидкістю врізання внаслідок зменшення діаметра і відповідно кругової подачі [8; 10]. Для підтримання постійного об’єму металу, що підводять до абразивного інструменту, добуток кругової подачі деталі на припуск повинний підтримуватися постійним.

Режими підвищували поки не виникало різке порушення робочої поверхні круга. Методика, однак, не враховує знос і стійкість круга, які будуть при таких жорстких умовах шліфування. Специфіка методу визначення $Q_{гр.}$ обумовлює отриманий у таблиці 1 характер впливу зернистості та твердості круга на граничне питоме зняття металу. Для матеріалу та зернистості кругів 24А16СМ1Б при обробці сталі, за властивостями подібної до сталі 45, отримані наступні дані по питомій продуктивності та проведений розрахунок [7] номінального та максимального значень товщини зрізу та кількості контактів.

Таблиця 1

Граничні значення режимів різання

№ досл.	$V_к$, м/с	$V_{дет}=V_к/60$	t, мм	$Q_{гр}$, мм^2/с	a_z, мкм	$a_{z\ max}$	$n/n_{різ}$
1	20	333	0.033	11	5,32	10.17	10/6
2	40	667	0,033	13	3.04	5.83	11/7
3	60	1000	0,028	18	2.01	3.78	15/10
4	80	1333	0,026	26	1.64	3.07	19/12
5	90	1500	0,025	38	1.59	2.84	25/16

Подібні дані можна отримати і для інших умов шліфування та характеристик кругів.

Практикою фірми "Junker maschinen" (Німеччина) [4] доведено, що при поздовжному шліфуванні орієнтованим інструментом продуктивність обробки може бути значно збільшена, а зношення круга значно меншим, приблизно на порядок. Продуктивність обробки збільшують через збільшення площі контакту навіть при зменшенні питомого навантаження.

Зношення круга зменшується з наступних причин.

По перше, зменшений вплив вібрацій у радіальному напрямку, які особливо відчутні при зміні товщини при великих значеннях швидкості різання. Крім того, через підведення основного припуску до торця при збільшенні площі контакту підвищується коефіцієнт демпфірування, що в свою чергу зменшує коливання.

По друге, розподіл товщини стружок при торцевій обробці має меншу дисперсію порівняно до поздовжного шліфування. Швидкість підведення металу залишається майже постійною вздовж зони контакту інструмента з заготовкою, що було доведено у роботі [9].

Ці обставини дозволяють збільшити продуктивність обробки при підвищенні стійкості інструмента.

Теоретичні дослідження граничної товщину зрізу з урахуванням їх імовірнісного характеру не проводились. Це підкреслює актуальність цього питання.

Формулювання цілей статті (постановка завдання)

Метою статті є розробка рекомендацій по підвищенню продуктивності шліфування за рахунок більш повного використання його різальної здатності при встановленні граничної товщини шару, що зрізується.

Для досягнення мети слід уточнити характер залежності граничної товщини зрізу та обґрунтувати вибір емпіричних коефіцієнтів. Необхідно також перевірити близькість отриманих коефіцієнтів з результатами розрахунку при використанні розробленої автором моделі товщини зрізу.

Виклад основного матеріалу

На основі аналізу ряду наведених виразів (3)-(8), бачимо, що при загальному підході до вибору стійкості інструмента, значення емпіричних коефіцієнтів значною мірою різняться. Крім того, за наведеними даними не завжди можливо проводити розрахунки та об'єктивне порівняння через їх неповноту.

Обґрунтовані середні значення коефіцієнтів можна обрати, використовуючи метод експертних оцінок [6], який широко використовують у практиці в подібних складних випадках.

Найпростіший та поширений спосіб отримання оцінок проводять за їх середнім значенням. Відомі різні види середніх величин: середнє арифметичне, медіана, мода, геометричне, середнє гармонійне, середнє квадратичне.

Узагальненням декількох з перерахованих є середнє за Колмогоровим. Для чисел $X_1, X_2,..., X_n$ таке середнє обчислюють за формулою

$$G\left\{\frac{F(X_1)+F(X_2)+...+F(X_n)}{n}\right\}, \qquad (9)$$

де F – строго монотонна функція; G – функція, обернена до F.

Так, якщо $F(x) = x$, то отримують середнє арифметичне, якщо $F(x) = \ln x$, то середнє геометричне, якщо $F(x)=1/x$, то середнє гармонійне, якщо $F(x) = x^2$, то середнє квадратичне і т.д. З іншого боку, такі популярні середні, як медіана і мода, не можна уявити у вигляді середніх за Колмогоровим.

За допомогою математичної теорії, розвинутої А.І. Орловим у 1970-х роках, вдається описати вид допустимих середніх в основних шкалах: абсолютній, найменувань; порядкової, інтервалів та інших.

Отже, середньоквадратичні значення коефіцієнтів ступеня є менш чутливі до впливу найменшої та найбільшої оцінок та дозволяють для однакових умов робити оцінки впливу швидкості та глибини різання, кругової подачі для виразів, подібних (4-8).

Для забезпечення максимально припустимої продуктивності шліфування слід уміти визначати граничну товщину зрізу $(a_z)_{max}$.

Для дослідження її граничного рівня використана математична модель [7], яка перевірена для випадків круглого та торцевого шліфування та довела свою ефективність. Однією з переваг цієї моделі є ймовірний характер отриманих залежностей – інформація подається у вигляді інтегральної функції або щільності розподілу товщини зрізів, звідки знаходять середнє та максимальне значення.

У роботі [7] отримана розрахункова модель випадкового процесу шліфування. Він визначається круговою подачею, глибиною та швидкістю різання, станом робочої поверхні круга та його маркою. Згідно з цією моделлю можна знайти апроксимоване рівняння товщини від вказаних параметрів.

Наприклад, для умов різання абразивним кругом 24А16СМ1, що пройшов термін припрацювання після виправлення, рівняння має вигляд:

$$a_z = \frac{32.06 \cdot v^{0.263} \cdot t^{0.218}}{v_к^{0.733}}. \qquad (10)$$

Таким чином, швидкість та кругова подача впливають більш інтенсивно на товщину шару, що зрізується, ніж глибина різання. Найбільший вплив відбувається орієнтовно при швидкості 50 м/с, коли стійкість інтенсивно зростає, а товщина – зменшується. Доведено адекватність математичної моделі, яка не має протиріч з отриманими експериментальними залежностями.

Вплив швидкості та глибини різання на товщину показаний для наведеного прикладу на рисунку 2.

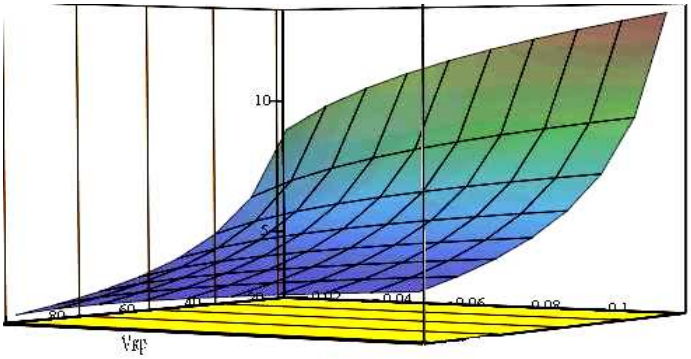


Рис. 2. Графік залежності товщини зрізу від швидкості та глибини різання

Оцінки впливу швидкості різання та товщини зрізів на стійкість круга (дивись вираз (3)) можна отримати, наприклад, використовуючи метод експертних оцінок через показники їх ступенів. Для цього знаходять інтегральний вплив глибини та кругової подачі як середнє квадратичне значення коефіцієнтів ступенів з теоретичної (10) та дослідних (4, 6, 7, 9) залежностей. Потім порівнюють отримані інтегральні оцінки через їх відношення, яке характеризує шуканий показник ступеня при товщині зрізу. В останню чергу визначають вплив на стійкість швидкості шліфування, як остаток емпіричного зваженого показника ступеня для даних умов та збільшеного розрахункового значень.

Виконуючи нескладні розрахунки, можна для наведеного прикладу помітити відчутний вплив товщини зрізу на стійкість – значення показника ступеня близькі до 5. Однак відомо, що сама товщина зрізу змінюється незначно для широкого діапазону кінематичних умов.

Таким чином, зменшуючи товщину зрізу, можна значною мірою підвищувати стійкість інструмента при високій жорсткості системи ВПІД, що підтверджується практикою фірми “Junker maschinen”.

У площині основи графіка (рис.2 – осі *V-t*) існує область, в якій значення стійкості шліфувального інструменту гарантовані.

Встановимо вплив товщини зрізів на зношення абразивного круга.

На відміну від лезвійної обробки, в зрізанні припуску бере участь значна кількість різальних кромок при різноманітних товщинах зрізів. Деякі з них працюють у режимі катастрофічного зношення (3 ділянка на рис.1) через різну висоту їх положення, вібрації та малу різницю значень мінімальної товщини зрізу $(a_z)_{min}$ від її граничних найбільших значень $(a_z)_{max}$.

Залежність, якою можна апроксимувати графік на рис.1, для однієї кромки зерна від товщини зрізу може мати вигляд:

$$Q_к(a_z) = C_1 \cdot a_z^{k_1} + C_2 \cdot a_z^{k_2}. \quad (11)$$

Другий доданок характеризує зношення кромки, яке буде відбуватись за умови, коли $a_z > (a_z)_{\max}$. Точка перегину на рис.1 відповідає умові рівності других похідних, коли швидкість зростання впливу другого доданка дорівнює спаду першого.

Пропонується зношення круга визначати пропорційним кількості зрізів більших граничного значення $(a_z)_{max}$:

$$Q_a(a_z) = C_1 \cdot a_z^{k_1} \cdot F(a_z) + C_2 \cdot a_z^{k_2}(1 - F(a_z)), \quad (12)$$

де $k_1<1$, $k_2>1$ – показники ступенів при товщині зрізу.

$F(a_z)$, $(1–F(a_z))$ – значення інтегральної функції розподілення розрахункової товщини зрізів, котрі визначають частку товщини зрізів, менших та більших вказаного граничного значення a_z. Інтегральна функція розподілу ймовірностей товщини стружок була знайдена за моделлю процесу шліфуваня в роботі [7].

Висновки

Розроблена методика дозволяе враховувати стан робочої поверхні круга, змінні технологічні параметри процесу шліфування на граничну товщину зрізу, яка визначає ефективність обробки шліфуванням. Методика не накладає обмежень на кінематику процесу та стан робочої поверхні круга. Її можна використовувати для знаходження зношення абразивного інструменту.

Список використаних джерел

1. Васин С. А. Резание материалов. Термо-механический поход к системе взаимосвязей при резании: учебник для техн. вузов / С. А. Васин, А. С. Верещака, В. С. Кушнір. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 448 с.: ил.

2. Кальченко В. В. Научные основы эффективного шлифования со скрещивающимися осями инструмента и обрабатываемой детали: автореф. дис. на соиск. уч. степ. доктора техн. наук. / В. В. Кальченко. – Харьков, 2006. – 36 с.

3. Корчак С. Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей / С. Н. Корчак. – М.: Машиностроение, 1974. – 280 с.

4. Круглое шлифование с ЧПУ/ Проспект фирмы “Junker maschinen” на станке “Quickpoint 1001” и “Quickpoint 1002”. Erwin Junker. Maschinen fabrik Gmbh, Junkerstraβe 2. Postfach 25. D 7618 Nordrach. Germany. 1991, 16 с.

5. Маслов Е. Н. Теория шлифования металлов / Е. Н. Маслов. – М.: Машиностроение, 1974. – 319 с.

6. Орлов А. И. Экспертные оценки / А. И. Орлов. – Москва: Наука, 2002. – 31 с.

7. Рудик А. В. Визначення товщини шару, що зрізується кромкою орієнтованого абразивного інструменту / А. В. Рудик // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. – Чернігів: ЧДТУ, 2010. – № 42. – С. 128-136.

8. Рудик А. В. Перерозподіл навантажень при поздовжному глибинному шліфуванні / А. В. Рудик // Вісник Чернігівського державного технологічного університету: збірник. – Чернігів: ЧДТУ, 2011. – № 1(47). – С. 24-29.

9. Рудик А. В. Продуктивність обробки торців на торцево-шліфувальних верстатах / А. В. Рудик, В. А. Рудик // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. – Чернігів: ЧДТУ, 2010. – № 45. – С. 57-67.

10. Филимонов Л. Н. Высокоскоростное шлифование / Л. Н. Филимонов. – Л.: Машиностроение, 1979. – 248 с., ил.

УДК 621.3.05

О.В. Будьонний, канд. техн. наук
М.А. Прокопець, магістрант
Є.Ю. Коваленко, магістрант
НТУУ «КПІ», м. Київ, Україна

БЕЗКОНТАКТНА ЗАРЯДКА АКУМУЛЯТОРНИХ БАТАРЕЙ

Пропонується використання безконтактного заряду акумуляторних батарей на основі теорії теслівських процесів для передачі енергії без дротів на невеликі відстані. Розрахунок енергетичних параметрів схеми передачі енергії проводився методом часткових ємностей між передавальними та приймальними антенами з урахуванням крайових ефектів. Проведено аналіз залежності струму та напруги навантаження від таких факторів: зміщення розташування пристрою, який заряджається, відносно центру блоку підзарядки; відстані між передавальними та приймальними антенами; значення індуктивності в навантаженні; робочої частоти.

Вступ

Останнім часом широкого використання набувають технології на основі електронних датчиків (ідентифікаторів) [1], які можуть бути вбудовані в упаковку товарів чи одяг для контролю їх переміщень у магазинах, складських приміщеннях тощо. Умовами використання таких датчиків є наявність вбудованого джерела живлення та герметичність. Ці умови можуть бути вирішені за допомогою безконтактної підзарядки акумуляторних батарей.

Однією з переваг бездротового способу передачі енергії, в порівнянні із найбільш розповсюдженим нині провідниковим, є відсутність елементів, що з'єднують джерело та приймач електричної енергії, а також можливість передачі енергії герметичним об'єктам.

Передача енергії може здійснюватися за рахунок струмів, які виникають при проходженні через ємності між «антенами» блоку підзарядки та ідентифікатора (рис.1). У цьому випадку під терміном «антени» слід розуміти: провідник будь-якої форми, що утворює ємності, які в науковій літературі також мають назву часткові ємності [2]. У процесі передачі електричної енергії магнітна складова електромагнітного поля значно менша за електричну складову, на відміну від передачі за допомогою випромінювання електромагнітної енергії.

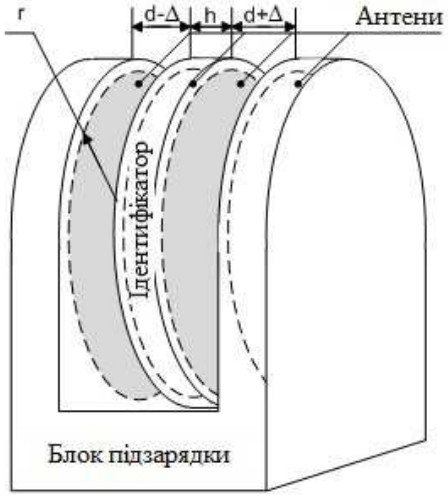


Рис. 1. Підзарядка ідентифікаторів: r – радіус пластинчастих антен; d – відстань, на яку здійснюється бездротова передача енергії; h – відстань між антенами ідентифікатора; Δ – зміщення ідентифікатора відносно центру блоку підзарядки

Мета

Метою цієї роботи є визначення параметрів процесу безконтактного заряду акумуляторних батарей для малогабаритних електронних пристроїв.

Моделювання та аналіз навантажувальних характеристик

Функціональна схема безконтактної підзарядки акумуляторних батарей представлена на рис. 2.

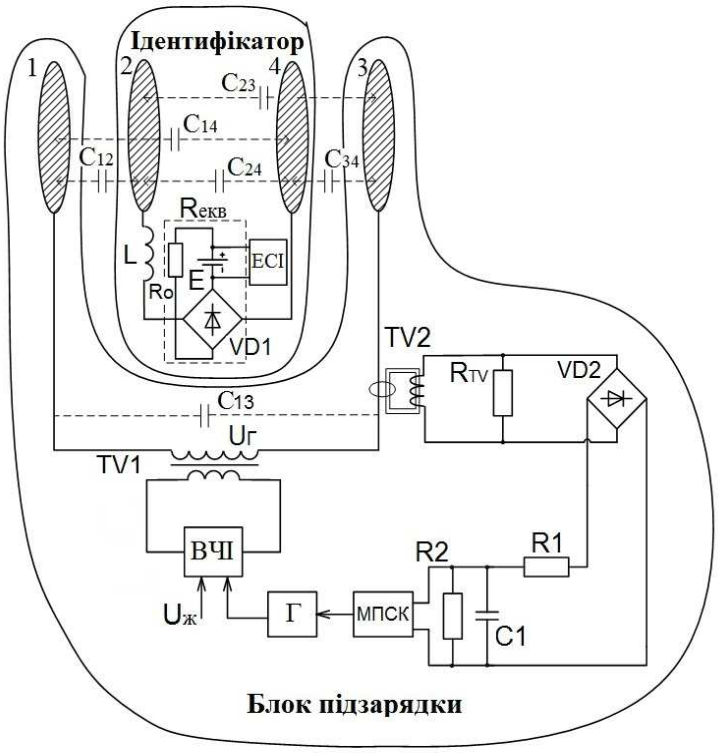


Рис. 2. Функціональна схема безконтактної підзарядки акумуляторних батарей

Розглянемо принцип роботи блоку підзарядки за цією схемою. Напруга живлення $U_Ж$ надходить до високочастотного інвертора (ВЧІ), а далі поступає на трансформатор $TV1$, який використовується для одержання рівня необхідної напруги $U_Г$. Передача енергії від блоку підзарядки до ідентифікатора здійснюється за допомогою часткових ємностей C_{12}, C_{13}, C_{14}, C_{23}, C_{24}, C_{34} між антенами, де 1, 3 – передавальні антени, а 2, 4 – приймальні антени. Навантаження поданої схеми має вигляд індуктивності L та еквівалентного навантаження $R_{екв}$, які разом з частковими ємностями між антенами утворюють резонансну систему $R_{екв}$ представлено у вигляді струмообмежуючого опору *Ro*, випрямляючого моста *VD1* та акумуляторної батареї *E*. До акумуляторної батареї *E* під'єднано електронну схему ідентифікатора (ECI). Трансформатор струму *TV2* введений у схему для вимірювання значення струму у вторинній обмотці трансформатора *TV1*. Напруга після *TV*2 випрямлена діодним мостом *VD2* через *RC* -фільтр (R_1 та C_1) надходить на мікропроцесорну систему керування (МПСК) та генератор *Г*, імпульси якого керують ВЧІ.

Застосування пластинчастих антен, у порівнянні із дротяними антенами [3], дозволяє отримати більший струм заряду, за рахунок збільшення величини часткових ємностей.

Розрахунок енергетичних параметрів схеми передачі енергії проводився методом часткових ємностей між передавальними та приймальними антенами. Еквівалентна схема передачі енергії при цьому є неврівноваженою мостовою схемою.

Розрахунок часткових ємностей проводився з урахуванням результатів праць [3-5]. При цьому необхідно врахувати, що об’єкт, який заряджається, може бути зміщений відносно центру блока підзарядки на величину Δ, де Δ – визначається повітряним зазором між корпусом блока підзарядки та корпусом пристрою, який підзаряджується.

Аналіз проводився методом еквівалентного генератора з додатковим урахуванням крайових ефектів [2], які необхідно врахувати при невеликих розмірах передавальних та приймальних антен та високих робочих частотах, за умов: радіус пластинчастих антен $r = 10мм$; відстань, на яку здійснюється бездротова передача енергії, при розташуванні

об'єкта, що заряджається, по центру блоку підзарядки $d = 1$мм; відстань між антенами 2 та 4 (рис. 2) $h = 5$мм; частота генератора $f = 10$МГц; індуктивність котушки $L = 50$мкГн; напруга на вторинній обмотці $TV1$ $U_Г = 22$В; еквівалентний опір навантаження:

$$R_{екв} = R_o + R_{а.б.} = R_o + \frac{U_{а.б.}}{I_{з.с.}} = 13 + \frac{2,3}{0,1} = 36\,\text{Ом}, \quad (1)$$

де R_o – струмообмежуючий опір, $R_{а.б.}$, $U_{а.б.}$, $I_{з.с.}$ – опір, напруга та зарядний струм акумуляторної батареї. Розміри пластинчастих антен підібрані по формі датчиків-ідентифікаторів.

Ємність відокремленої круглої пластини C_0 розраховується за формулою:

$$C_0 = \frac{\varepsilon \cdot S}{\text{arsh}(1)+\text{arsh}(1)} \approx 1.578\,\text{пФ}; \quad (2)$$

де $S = \pi r^2$ – площа пласти; ε – абсолютна діелектрична проникність середовища, для повітря близька до діелектричної проникності вакууму $\varepsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12}\ \Phi/\text{м}$.

Розрахунок часткових ємностей проводився з урахуванням крайових ефектів при умові, що $2r/(d-\Delta) > 0,25$ та зміщення ідентифікатора відносно центру блоку підзарядки рівне нулю ($\Delta = 0$мм):

$$C_{12} \approx \left[\frac{\varepsilon \cdot S}{(d-\Delta)} + 0,5C_0\right] \cdot k_{12}, \quad (3)$$

$$C_{13} \approx \left[\frac{\varepsilon \cdot S}{(h+2d)} + 0,5C_0\right] \cdot k_{13}, \quad (4)$$

$$C_{14} \approx \left[\frac{\varepsilon \cdot S}{(d-\Delta+h)} + 0,5C_0\right] \cdot k_{14}, \quad (5)$$

$$C_{23} \approx \left[\frac{\varepsilon \cdot S}{(d+\Delta+h)} + 0,5C_0\right] \cdot k_{23}, \quad (6)$$

$$C_{24} \approx \left[\frac{\varepsilon \cdot S}{h} + 0,5C_0\right] \cdot k_{24}, \quad (7)$$

$$C_{34} \approx \left[\frac{\varepsilon \cdot S}{(d+\Delta)} + 0,5C_0\right] \cdot k_{34}, \quad (8)$$

де у формулах (3)-(8): перший множник – ємність пластин без урахування крайових ефектів; другий множник – коефіцієнт $k_n = 1 + A + B \cdot \ln C$, який характеризує вплив крайових ефектів на часткові ємності [2] та його значення залежно від відстані між антенами (табл. 1). Порівняльні дані значень часткових ємностей представлені в табл. 2.

Таблиця 1

Розрахункові значення коефіцієнтів A, B і C для різних k_n

Коефіцієнт k_n	Коефіцієнти при врахуванні крайових ефектів		
	A	B	C
k_{12}, k_{34}	$\frac{3d}{4r}$	$\frac{d}{\pi r}$	$\frac{r}{d}$
k_{13}	$\frac{6d+3h}{4r}$	$\frac{2d+h}{\pi r}$	$\frac{r}{2d+h}$
k_{14}, k_{23}	$\frac{3(d+h)}{4r}$	$\frac{d+h}{\pi r}$	$\frac{r}{d+h}$
k_{24}	$\frac{3h}{4r}$	$\frac{d}{\pi r}$	$\frac{r}{h}$

Таблиця 2

Числові значення часткових ємностей

Часткові ємності	Числові значення		Зміна значення ємності
	Без урахування крайових ефектів	З урахуванням крайових ефектів	
C_{12}, C_{34}	3,571пФ	4,1пФ	+15%
C_{13}	1,186пФ	1,904пФ	+60%
C_{14}, C_{23}	1,253пФ	1,938пФ	+55%
C_{24}	1,345пФ	1,998пФ	+49%

У випадку, коли внутрішнім опором інвертора та трансформатора можна знехтувати, напруга у розімкненій вітці 2-4 визначається за формулою [6]:

$$U_{42} = U_{\Gamma} \cdot \left(\frac{Z_4}{Z_3 + Z_4} - \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} \right) = 4{,}8 \ B, \tag{9}$$

де $Z_1 = \frac{1}{j\omega \cdot C_{14}} = -j \cdot 8{,}21 \cdot 10^3$ Ом, $Z_2 = \frac{1}{j\omega \cdot C_{34}} = -j \cdot 3{,}882 \cdot 10^3$ Ом,

$Z_3 = \frac{1}{j\omega \cdot C_{23}} = -j \cdot 8{,}21 \cdot 10^3$ Ом, $Z_4 = \frac{1}{j\omega \cdot C_{12}} = -j \cdot 3{,}882 \cdot 10^3$ Ом.

Струм вітки I_{42} між антенами 4-2:

$$I_{42} = \frac{U_{42}}{\left(Z_{24} + \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2} + \frac{Z_3 \cdot Z_4}{Z_3 + Z_4} \right)} = 0{,}046 + j \cdot 0{,}04 = 0{,}061 e^{j40^\circ} \text{ А}. \tag{10}$$

Опір навантаження:

$$Z_{42} = \left(\frac{Z_H}{1 + Z_H \cdot j\omega \cdot C_{24}} \right) = 98{,}166 + j \cdot 5187 = 5188 e^{j89^\circ} \text{ Ом}, \tag{11}$$

$$Z_H = R_{екв} + j\omega L = (36 + j \cdot 3{,}142 \cdot 10^3) = 3{,}142 e^{j89^\circ} \text{ Ом}.$$

Струм у навантаженні:

$$I_H = \frac{I_{42}}{(1 + Z_H \cdot j\omega \cdot C_{24})} = 0{,}077 - j \cdot 0{,}065 = 0{,}101 e^{j40^\circ} \text{ А}. \tag{12}$$

Значення переданого струму залежить від таких параметрів, як: напруги U_{Γ} на вторинній обмотці трансформатора $TV1$, відстані та крайових ефектів антен, величини повітряного зазору та зміщення розташування підзарядного об'єкта в блоці підзарядки відносно центру.

Потужність та напруга на навантаженні:

$$S_H = Z_H \cdot I_H^2 = -31{,}289 + j \cdot 5{,}716 = 31{,}8 e^{j170^\circ} \text{ВА}, \tag{13}$$

$$U_H = Z_H \cdot I_H = -201{,}055 + j \cdot 243{,}94 = 316 e^{j129^\circ} \text{ В}. \tag{14}$$

За наведеними формулами зроблено аналіз струму та напруги навантаження від різних факторів впливу. На рис. 3, *а* зображена залежність струму навантаження від зміщення ідентифікатора Δ відносно центра блоку підзарядки (за умови, що $r = 10$мм, $d = 1$мм, $h = 5$мм, $f = 10$МГц, $L = 50$мкГн, $U_{\Gamma} = 22$В, $R_{екв} = 36$ Ом), яка показує, що значення струму навантаження змінюється залежно від величини Δ. Змінюючи одночасно параметри величин h, d, L та f, є можливість отримати незмінне значення струму навантаження, про що свідчить рис. 3, *б* ($\Delta = 0$мм) та рис. 4, *а*.

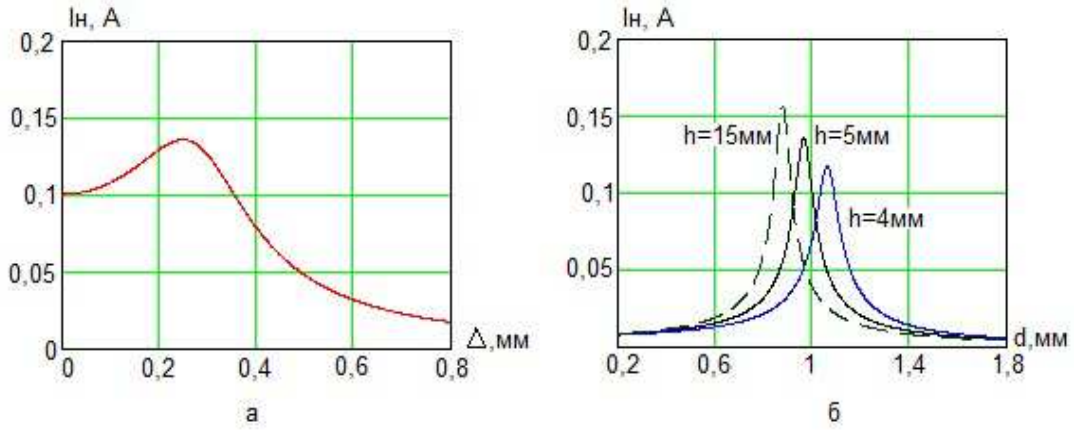


Рис. 3. Залежність струму навантаження від зміщення ідентифікатора Δ (а) та відстані d між антенами 1-2 (б)

Зі збільшенням частоти та зменшенням значення індуктивності струм навантаження та напруга на індуктивності при резонансі змінюються повільніше, що ілюструють рис. 4, *а* та рис. 4, *б*. Рисунок 5, *а* відображає зміну струму навантаження від частоти залежно від впливу крайових ефектів передавальних та приймальних антен та показує, що неврахування крайових ефектів може призвести до втрати або недосягнення необхідного значення струму навантаження. Залежно від частоти роботи інвертора та симетричності розташування ідентифікатора в блоці підзарядки струм навантаження набуває різних значень (рис. 5, *б*).

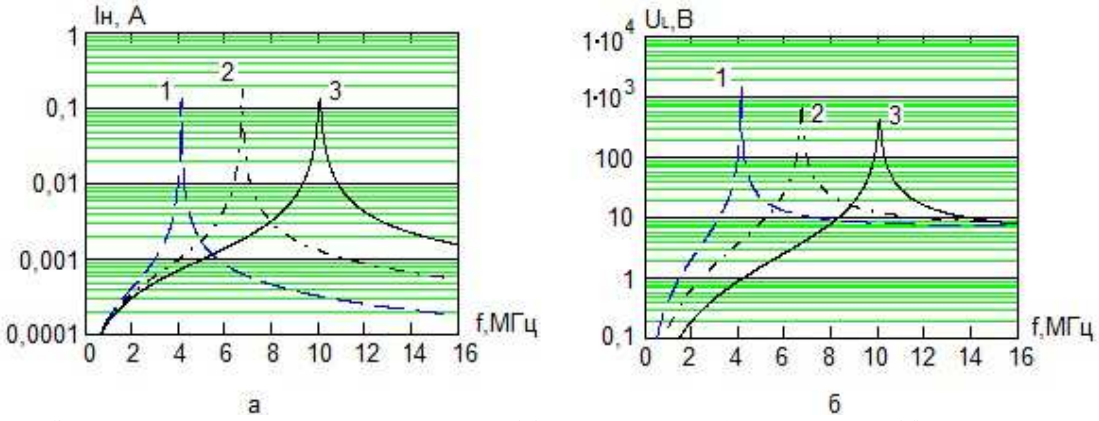


Рис. 4. Залежність струму навантаження (а) та напруги індуктивності (б) від частоти при фіксованих значеннях індуктивності: 1 – L=400 мкГн; 2 – L=150 мкГн; 3 – L=50 мкГн

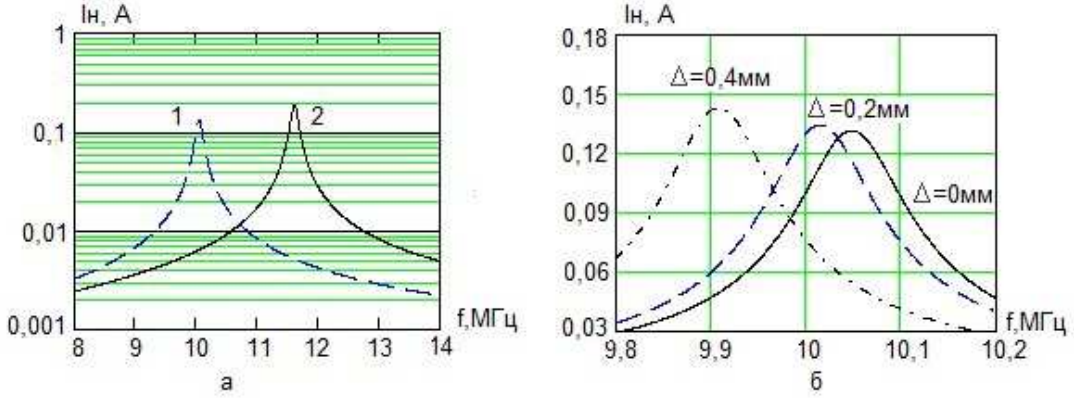


Рис. 5. Залежність струму навантаження від частоти: а) 1– з урахуванням крайових ефектів, 2 – без урахування крайових ефектів; б) при різних значеннях зміщення Δ

Введення мікропроцесорної системи керування в схему підзарядки забезпечить визначення резонансної частоти по найбільшому значенню переданого струму. Резонансна частота, при якій досягається максимальне значення переданого струму, залежить

від зміщення розташування підзарядного об'єкта відносно центра блоку підзарядки, тому використання МПСК, яка автоматично знаходить резонансну частоту шляхом визначення максимального значення переданого струму, є доцільним.

Висновки

У цій статті проаналізовано вплив геометричних розмірів і розташування приймальних та передавальних антен на величину струму заряду.

Показано, що безконтактна передача енергії можлива, коли відстань, на яку здійснюється передача енергії, має один порядок з відстанню між передавальними антенами.

Досліджено вплив крайових ефектів для випадку незначних площ пластинчастих антен та великої робочої частоти. Показано, що вплив крайових ефектів на величину часткових ємностей є суттєвим. Значення переданого в навантаження струму зменшується з урахування крайових ефектів.

Показана необхідність введення в схему підзарядки мікропроцесорної системи керування, за допомогою якої є можливість підтримувати струм заряду на певному необхідному рівні незалежно від впливу різних параметрів.

Список використаних джерел

1. Режим доступу: http://www.guardian.co.uk/technology/2006/nov/02/news.egovernment.
2. Ландау Л. Д. Электродинамика сплошных сред / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц // Теоретическая физика. Том 8. – М.: Наука, 1982. – 622 с.
3. Пентегов И. В. Применение тесловских процессов для бесконтактного заряда аккумуляторов портативных электронных и электротехнических устройств / И. В. Пентегов, И. В. Волков, А. Л. Приступа // Технічна електродинаміка. Тем. вип. "Проблеми сучасної електротехніки". – 2006. – Ч. 2. – С. 16-21.
4. Приступа А. Л. Розвиток теорії та методів розрахунку теслівських процесів щодо передачі енергії без проводів: автореферат на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: 05.09.05 / А. Л. Притступа – Київ, 2008.
5. Пентегов И. В. К теории тесловских процессов зарядки емкостных накопителей энергии / Пентегов И. В. // Электричество. – 1996. – № 6. – С. 42-47.
6. Пентегов И. В. О возможности беспроводной передачи энергии с помощью тесловских процессов / И. В. Пентегов, А. Л. Приступа // Техническая электродинамика. – 2005. – № 3. – С. 11-15.

УДК 629.3.026

О.М. Міщенко, студент
М.В. Міщенко, канд. техн. наук
Чернігівський державний інститут економіки і управління, м. Чернігів, Україна

ВИКОРИСТАННЯ ГІБРИДНИХ СИЛОВИХ УСТАНОВОК НА МІСЬКОМУ ТРАНСПОРТІ ЗАГАЛЬНОГО КОРИСТУВАННЯ

Досліджено гібридні силові установки, призначені для використання в міському пасажирському транспорті загального користування.

Постановка проблеми

Сучасна дійсність вимагає прискіпливого й економного ставлення до довкілля, особливо в містах. Інфраструктура міст не може обійтись без транспорту загального користування, який у більшості випадків є все більш затратним та екологічно небезпечним. Постійне підвищення цін на паливно-мастильні матеріали вимушує підвищувати ціни на проїзд, що негативно відбивається на добробуті населення міст.

Для зменшення витрат на паливно-мастильні матеріали, а також поліпшення екологічної ситуації в містах є сенс використовувати на міському транспорті загального користування гібридні силові установки.

Аналіз досліджень і публікацій

Перші спроби використання гібридних силових установок були проведені ще у Радянському Союзі під керівництвом Н. В. Гуліа. Був створений прототип гібридного вантажного автомобіля УАЗ-450, де накопичувачем енергії слугував маховик, а трансмісією – варіатор. У 1966 році на цьому гібридному автомобілі було досягнуто економії палива до 50 %.

У 1972-73 роках у місті Курськ також були проведені випробовування міських гібридних автобусів під керівництвом Н.В. Гуліа, в основі яких був двигун внутрішнього згорання, маховик та варіатор. Крім того, були побудовані та використані силові агрегати на основі гідроприводу. У гідроприводах накопичувачем енергії були балони із стиснутим азотом і маслом. Незважаючи на різні принципи дії цих гібридних автобусів, витрата палива знижалась приблизно в два рази, а токсичність викидів у декілька разів.

Мета роботи

Запропонувати схему гібридної силової установки для міського пасажирського транспорту, яка зменшить витрату палива транспортним засобом і зменшить негативний вплив на екологічний стан міст нашої країни.

Об’єкти і методи досліджень

Об’єктом досліджень у статті є міський пасажирський транспорт загального користування, який, наряду з іншими транспортними засобами, в значній мірі негативно впливає на екологічний стан густонаселених міст.

Виклад основного матеріалу

В основі сучасних гібридних силових установок можна використати двигун внутрішнього згорання, електродвигун, блок акумуляторних батарей та комп'ютерну систему керування.

Використання такої схеми гібридної силової установки дає змогу в транспорті використовувати для руху двигун внутрішнього згорання меншої потужності, що призводить до економної витрати палива і поліпшення екологічного стану довкілля.

Трансмісія гібридного транспортного засобу працює наступним чином (рис. 1): на початку руху транспортного засобу водій натискає на педаль керування 13, сигнал з якої надходить у двигун внутрішнього згорання 8 і в бортовий комп’ютер 14, двигун внутрішнього згорання 8, через коробку передач 9, починає передавати крутний момент на колеса 12 через редуктор 10. Датчик крутного моменту 11 виробляє сигнал для бортового комп’ютера 14. При недостатньому крутному моменті, який залежить від навантаження на транспортний засіб і від розташування педалі керування 13, комп’ютер 14 подає сигнал на перемикач 2, який під’єднує блок акумуляторних батарей 1 до електродвигуна 3. Електродвигун 3, через обгонну муфту 5, передає крутний момент на колеса 7 за допомогою редуктора 6 – транспортний засіб починає рух.

Швидкість обертання валу електродвигуна стає меншою, порівняно з валом двигуна внутрішнього згорання. Коли транспортний засіб починає рухатись рівномірно, без зайвих навантажень, тоді обгонна муфта 5 від’єднує електродвигун 3 від коліс 7, сигнал з бортового комп’ютера 14 виробляє сигнал для перемикача 2, який від’єднує акумуляторну батарею 1 від електродвигуна 3 і під’єднує до генератора 4. Акумуляторна батарея 1 підзаряжається від генератора 4 за рахунок двигуна внутрішнього згорання.

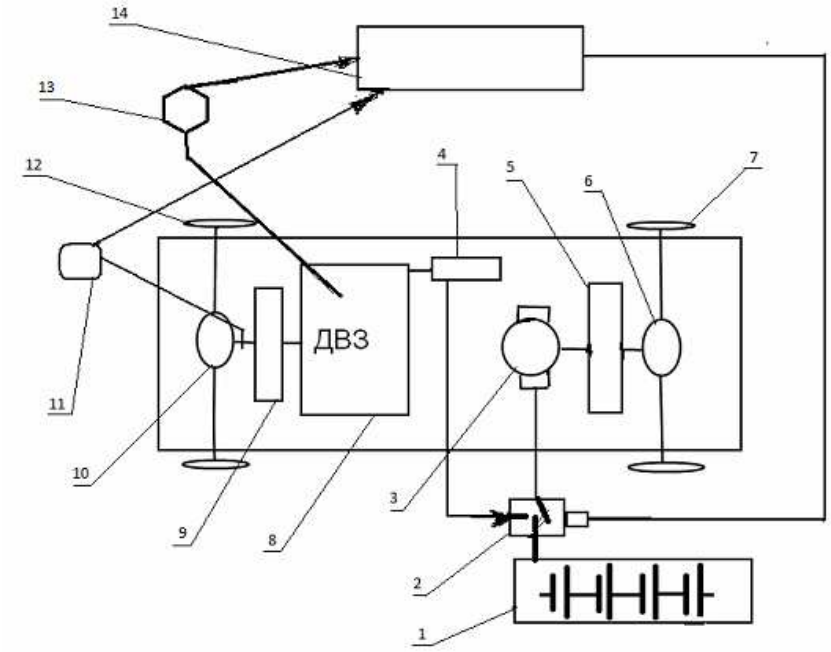


Рис. 1. Схема трансмісії гібридного транспортного засобу

Алгоритм роботи комп'ютерної системи керування, в цьому випадку для міського транспорту загального користування, зображений на рис. 2.

ПОЧАТОК РУХУ – в роботу вступає двигун внутрішнього згорання та електродвигун

↓

ТРАНСПОРТНИЙ ЗАСІБ РУХАЄТЬСЯ РІВНОМІРНО БЕЗ ЗАЙВИХ НАВАНТАЖЕНЬ – працює тільки двигун внутрішнього згорання, який передає крутний момент на колеса

↓

ТРАНСПОРТНИЙ ЗАСІБ ЗУПИНЯЄТЬСЯ ДЛЯ ВИСАДКИ ТА ПОСАДКИ ПАСАЖИРІВ – працює тільки двигун внутрішнього згорання на малих обертах, який за допомогою генератора заряджає блок акумуляторних батарей

↓

ТРАНСПОРТНИЙ ЗАСІБ ПОЧИНАЄ РУХАТИСЬ – працює двигун внутрішнього згорання і в роботу вступає електродвигун, який живиться від попередньо заряджених акумуляторних батарей

↓

ТРАНСПОРТНИЙ ЗАСІБ РУХАЄТЬСЯ РІВНОМІРНО БЕЗ ЗАЙВИХ НАВАНТАЖЕНЬ – працює тільки двигун внутрішнього згорання, який передає крутний момент на колеса

↓

КІНЦЕВА ЗУПИНКА МАРШРУТНОГО ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ – двигун внутрішнього згорання та електродвигун не працюють, зарядка акумуляторних батарей проводиться від зовнішнього джерела струму

Рис. 2. Алгоритм роботи комп'ютерної системи керування

Висновки

Запропонована схема гібридної силової установки транспортного засобу загального користування для міських пасажирських перевезень, а також алгоритм роботи комп'ютерної системи керування, яка в значній мірі може знизити витрату палива і, таким чином, зменшити вартість пасажирських перевезень у містах і поліпшити екологічний стан довкілля.

Список використаних джерел

1. Режим доступу: http://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/72359.
2. Тракторы и автомобили / под редакцией д-ра техн. наук, проф. В. А. Скотникова. – М.: Агропромиздат, 1985. – 440 с.

УДК 621.01

В.А. Максименко, канд. техн. наук
М.И. Барбаш, ст. преподаватель
Черниговский государственный технологический университет, г. Чернигов, Украина

СИСТЕМНОЕ ОЦЕНИВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Рассмотрена методика прикладного анализа направлений проведения оценивания технической системы, проверки рациональности ее применения в контексте имеющихся окружающих условий. Предложен механизм реализации оценивания для стандартных узлов деталей машин и транспортных средств.

Постановка проблемы

Разнообразие вариантов реализации решений технических задач, ставящихся современной промышленностью, делает необходимым их оценивание, то есть проведение проверки целесообразности применения в имеющихся условиях.

Целью исследования является прикладной анализ способов сравнения свойств объектов (долговечности, размеров, дизайна) для оптимального осуществления выбора из имеющегося множества.

Анализ публикаций

Методология оценивания [1] берет из частных наук исходные пункты для своих построений, но всегда при этом вынуждена изменять заимствованные понятия, приспособляя их к универсальности своих задач. Универсальность же схемы подбора такова, что она очевидным образом применима ко всякому комплексу и ко всякой его части во всякий момент, поскольку это в сущности просто определенная точка зрения, с которой можно подходить к любому факту.

Это утверждение относится также к производству всякого изделия: оно заключает в себе момент подбора, который регулирует весь ход изменений материала на пути к окончательному результату; изменение, соответствующее задаче, сохраняется, не соответствующее устраняется новым воздействием. В этом виде принцип оценки оптимального варианта весьма еще далек от своей теоретической, т. е. обобщенной, формы. Переходным звеном служат те частные технические способы реализации, которые можно назвать косвенным трудовым подбором: обособление полезного от ненужного (вредного) для сохранения одного свойства и устранения другого в них выполняется не прямой активностью человека, а другими активностями и сопротивлениями. Труд, однако, не сводится целиком к оцениванию. Подобно подбору в природе, труд всегда направлен к сохранению или разрушению определенных форм; но первый вариант опирается на изменчивость форм, которая непосредственно не зависит от него; второй же не только пользуется независимо от него возникающими изменениями объектов, чтобы сохранять полезные и уничтожать вредные, но также и сам вызывает эти изменения.

Так в самых различных специальных отраслях пробивает себе дорогу один и тот же принцип. Но благодаря господству специализации в этом его развитии нет единства; он

является во многих вариациях и оттенках, связь и соотношения которых остаются неясными. Общность метода очевидна, но его схема не определена точно, и его перенесение из одних областей в другие происходит без планомерности, более или менее случайно, а оттого результаты часто бывают ничтожны там, где при большей сознательности применения метод был бы очень полезен.

В этом и заключается смысл исследования: объединить разрозненное, установить тот общий организационный метод, применениями которого являются все вариации оценивания на практике и в теории.

Изложение исследований

Развивая теоретические положения исследований [2], можно сформулировать два основных критерия сопоставления технических систем.

1. Интуитивный – субъективный способ, определяющийся длительным опытом работы по направлению, связанному с проведением оценки. Применяется при недостатке сведений об объекте и опирается на подсознательное применение справочной информации. Способ малоприменим к объектам, в которых реализованы новые технологии (например, назначение режимов резания для высокоскоростной механической обработки и выбор инструмента не могут быть проведены, опираясь на опыт низкоскоростной обработки).

2. Объективный, проводимый на основе определяющих критериев. Является основным для проведения оценивания. Проводится по следующим этапам.

А. Выбор обобщенного показателя. Заключается в выборе одной или нескольких групп показателей для последующего анализа, из которых различают:

Технические показатели – множество свойств объекта, относящееся к функционированию, обслуживанию и производству.

Экономические показатели – свойства, определяющие затраты на производство, эксплуатацию и себестоимость использования.

Потребительские показатели – внешние качества объекта (цвет, форма, удобство ремонта).

Б. Выбор свойств (критериев) для оценки. Заключается в получении конкретных свойств из упомянутых множеств с учетом возможности их количественной оценки и полноты характеризации ими объекта. Кроме этого, на этапе проектного и проверочного анализа могут оцениваться различные свойства. Например, на этапе проектной компоновки редуктора с цилиндрическими зубчатыми колесами принимаемый тип подшипника определяется типом зацепления (рис. 1), а на этапе проверочного расчета проводится оценивание по грузоподъемности или долговечности среди подшипников одного типа (рис. 2).

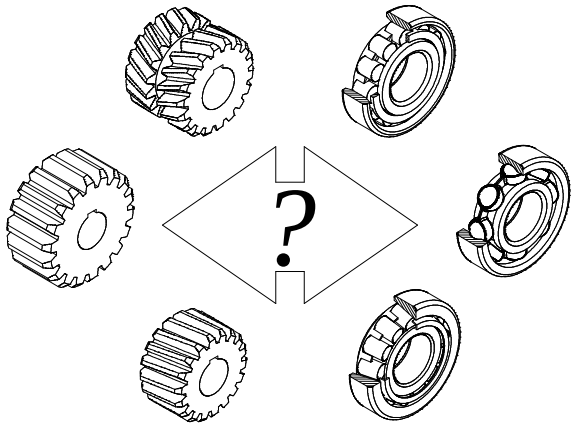


Рис. 1. Схема выбора проектного этапа

В. Проведение оценки по выбранным критериям. Содержит получение численных показателей по оцениванию свойств (рис. 2) или качественную оценку (красота, удобство – применяется для потребительских показателей).

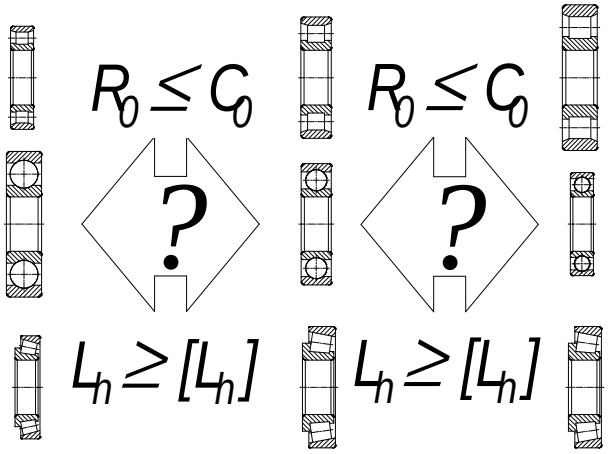


Рис. 2. Схема выбора проверочного этапа

Г. Преобразование оценок в обобщенный показатель. Заключается либо в поэлементном сравнении значений показателей (в простейшем случае), либо в построении обобщающих графиков с применением теории математического планирования.

Прикладной иллюстрацией схемы анализа технического показателя является проведение оценки элемента исходной технической системы [3] – подшипника качения, на этапе его проверочного расчета. Выбор ведется по одному из двух направлений [4]:

1) Статической грузоподъемности – применяется при угловой скорости вращения $\omega \le 0{,}1c^{-1}$; его формулировка:

$$R_0 \le C_0, \quad R_0 = X_0 \cdot R_r + Y_0 \cdot R_a, \tag{1}$$

где R_0 – эквивалентная статическая нагрузка на подшипник;

C_0 – статическая грузоподъемность подшипника, т.е. нагрузка, при которой его деформация не превышает 0,0001 диаметра тел качения;

R_r – суммарная радиальная нагрузка на подшипник;

R_a – осевая нагрузка;

X_0, Y_0 – коэффициенты осевого и радиального статического нагружения.

2) Динамической грузоподъемности – применяется при угловой скорости $\omega > 0{,}1c^{-1}$:

$$L_h = \frac{10^6 \cdot \pi \cdot L}{1800 \cdot \omega} \ge [L_h], \; L = \left(\frac{C}{R}\right)^m, \tag{2}$$

где L_h – расчетная долговечность подшипника, измеряемая в часах;

L – расчетная долговечность подшипника, измеряемая в миллионах оборотов;

$R = X \cdot R_r + Y \cdot R_a$ – эквивалентная динамическая нагрузка на подшипник;

X, Y – коэффициенты осевого и радиального динамического нагружения;

C – динамическая грузоподъемность подшипника, т.е. нагрузка, при которой подшипник с вероятностью 90 % проработает 10^6 оборотов.

Смысл расчетов заключается в реализации одной из последовательностей расчета, принимаемой в зависимости от величины угловой скорости и, путем последовательных итераций, обеспечении соблюдения условий указанных неравенств посредством варьирования в случае необходимости параметрами системы.

Оценку технической системы по потребительски показателям можно продемонстрировать сравнением (по данным [5]) автомобилей Daewoo Lanos (рис. 3, *а*) и Chevrolet Aveo (рис. 3, *б*) с одинаковой мощностью двигателя 86 л.с. Методика оценивания использовала следующие показатели: дизайн, эргономика, комфорт салона, ходовые качества.

а) *б)*

Рис. 3. Технические системы для потребительского оценивания

Оценка производится по 10-бальной шкале (табл. 1). Поскольку у разных потребителей вес каждого критерия по степени его ценности различный (для одних преимущество в динамике движения значит намного больше, чем величина багажника; для других багажник не менее важен, чем устойчивость на поворотах), предполагается равнозначность всех факторов при получении результата.

Таблица 1

Результаты оценивания

Параметр		Макс. оценка	Daewoo Lanos	Chevrolet Aveo
Дизайн	Внешность	10	7	6
	Интерьер	10	5	7
Эргономика и обзорность	Эргономика рабочего места	10	8	8
	Обзорность	10	7	5
Комфорт салона	Комплектация	10	4	8
	Комфорт	10	5	7
	Шумоизоляция	10	5	8
	Багажник	10	8	5
В движении	Плавность хода	10	7	8
	Управляемость	10	7	8
	Тормоза	10	8	9
Суммарный балл		110	71	79
Потребительское преимущество, %				+11,2 %
Цена, грн			49500	51150
Общее преимущество, %				+3,3 %

Все оценки суммируются и выводится общий балл, после чего определяется формальный победитель, с учетом сопоставления с разницей в стоимости. Если преимущество в потребительских качествах автомобиля выше, чем превышение его стоимости над конкурентом, тогда он становится победителем теста.

Показатели для сравнения формировались следующим образом.

Дизайн. Daewoo Lanos гармоничнее, пропорции здесь во всех ракурсах выдержаны неплохо. Chevrolet Aveo – автомобиль более новый и, как любая новинка, воспринимается ярче. Но в дизайне есть промахи – заметно рассогласование высокого кузова и небольших колес, особенно задних, которые выглядят маленькими на базовых версиях.

Эргономика. В Lanos и Aveo управление подрулевыми переключателями идентично. Микроклимат в салоне регулируется достаточно просто, но в Lanos проще включить режим рециркуляции простым рычагом, а в Aveo придется целиться в небольшую кнопку. В обзорности Aveo проигрывает вчистую – спереди и сзади габаритов автомобиля не видно вообще. Приходится парковаться “на ощупь”. Не спасают ситуацию и боковые зеркала. В Lanos такой проблемы нет. Здесь видны края передних крыльев, и сзади можно без проблем контролировать свой габарит.

Комфорт. Chevrolet Aveo выше и просторнее. Ширина (+180 мм) и высота (+100 мм) дверного проема в Aveo значительно больше – пригибаться при посадке приходится значительно меньше. Но само сидение в Aveo установлено выше, из-за чего преимущества более высокого кузова растрачивается. Шумоизоляция Chevrolet Aveo существенно эффективнее, чем в Lanos. Если на холостых оборотах эта разница еще не так ощутима, то после 3000 об/мин шум в Lanos уже становится слишком навязчивым.

В движении. Замеры разгонной динамики с хронометром особых отличий не выявили. А вот на скорости свыше 140 км/час Chevrolet Aveo более четко держит траекторию, тогда как Lanos уже начинает “плавать”. Эффективность подвески лучше на Aveo. Он легко проходит мелкие и средние неровности, да и слышны они в салоне меньше.

Выводы

В результате прикладного применения общих теоретических положений для технических систем различного уровня сложности выяснилось, что менее сложные механические объекты с аналитической точки зрения лучше оцениваемы, чем многоуровневые составные системы.

Таким образом, в результате исследования получена уточненная и конкретизированная примерами методика определения оптимального технического решения из множества имеющихся, этапы которой содержат потенциал для дальнейшей аналитической проработки.

Список использованных источников

1. Богданов А. А. Тектология. Кн.1 / А. А. Богданов – М.: Экономика, 1989. – 304 с.

2. Хубка В. Теория технических систем / В. Хубка – М.: Мир, 1987. – 208 с.

3. Максименко В. А. Аналитическое моделирование технической системы / В. А. Максименко // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. – Чернігів: ЧДТУ, 2011. – №2(49). – С. 10-14.

4. Павлище В. Т. Основи конструювання та розрахунок деталей машин / В. Т. Павлище – К.: Вища шк., 1993. – 556 с.

5. Режим доступу: http://daewoo-lanos.infocar.ua/test_lanos_id150.html.

УДК 621.941.025

В.В. Кальченко, д-р техн. наук
Чернігівський державний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

Ю.Д. Юрченко, ст. викладач
Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ РІЗАННЯ ПРИ ТОЧІННІ РІЗЦЯМИ З ВНУТРІШНІМ ТЕПЛОВІДВЕДЕННЯМ

Наведені результати експериментальних досліджень температури різання при обробці збірними токарними різцями з внутрішнім тепловідведенням.

Постановка проблеми

Підвищення зносостійкості різальних інструментів є однією з найбільш важливих задач сучасного машинобудування, вирішення яких може бути здійснене за рахунок розробки нових конструкцій різальних інструментів, що дозволяють підвищити продуктивність та точність механічної обробки, зменшити витрати дефіцитних інструментальних матеріалів та підвищити надійність процесів різання. До таких, принципово нових та прогресивних, різальних інструментів можна віднести конструкцію збірного токарного різця з внутрішнім тепловідведенням.

Одним із основних факторів, що впливають на інтенсивність зносу різального інструменту, є температура різання. Дослідженню температури різання при точінні присвячена велика кількість наукових праць, але вони не охоплюють сферу застосування збірних токарних різців з внутрішнім тепловідведенням.

Аналіз досліджень і публікацій

Токарна обробка твердосплавними інструментами супроводжується значними температурами (700-900^{0}С) в зоні різання, що приводять до зниження твердості поверхневих шарів інструмента, активізації адгезійних та дифузійних процесів на контактних ділянках різальних інструментів. Температура різання також впливає на процес стружкоутворення, наріст, усадку стружки, сили різання, якість обробленої поверхні і найбільшою мірою на зношування різальних інструментів [4; 5; 8].

Зменшення температури різання здійснюється переважно шляхом використання різноманітних мастильно-охолоджувальних середовищ. Але при обробці конструкційних матеріалів твердосплавними різцями з високими швидкостями різання та в умовах переривчастого різання безпосередня подача мастильно-охолоджувальних середовищ у зону обробки може привести до нерівномірного охолодження різальної пластини, внаслідок чого виникають теплові удари, які призводять до появи у твердому сплаві термічних тріщин та руйнування різальної кромки. В таких умовах зниження температури в зоні різання та підвищення стійкості інструменту може бути здійснене шляхом застосування збірних токарних різців з внутрішнім тепловідведенням [6].

Відомі теоретичні методи дослідження [3; 4; 8] дозволяють розробити математичні моделі та отримати аналітичні залежності для розрахунку температури різання залежно від умов процесу обробки. До головних недоліків таких методів слід віднести великий обсяг обчислень та значний перелік обмежень, що значно ускладнює їх застосування при дослідженні збірних інструментів з механічним кріпленням різальних пластин. Головним чином, теоретичні методи дослідження використовують для розрахунку температури різання для суцільних конструкцій інструментів.

При дослідженні збірних конструкцій інструментів виникають значні похибки розрахунків (30-50 %), що ставить під сумнів отримані результати.

Комп'ютерні методи дослідження [3] температури різання є зручними, наглядними та високопродуктивними, але разом з цим також існує ряд обмежень при їх використанні для дослідження збірних конструкцій інструментів, оскільки дуже складно відтворити реальні умови процесу різання. Для отримання достовірних результатів комп'ютерні моделі слід тестувати проведенням серій натурних експериментів [1].

Експериментальні методи дослідження [5; 7] у поєднанні з методами планування експерименту та статистичними методами обробки дослідних даних дозволяють отримати порівняно прості й адекватні математичні моделі, що дають можливість отримати достовірні дані. Головним недоліком такого методу дослідження є більш висока трудомісткість порівняно з вищенаведеними теоретичним та комп'ютерним методами.

На основі проведеного аналізу можна зробити висновок, що для дослідження температури різання при точінні збірними різцями з внутрішнім тепловідведенням найбільш доцільним є застосування експериментального методу.

За даними [2; 4; 5] для розрахунку оптимальних швидкостей та подач найбільший інтерес представляє оптимальна і постійна для відповідних умов температура різання Θ_o, при досягненні якої спостерігається найменша інтенсивність відносного поверхневого зносу.

Мета статті

Встановлення основних закономірностей впливу на температуру різання умов процесу точіння збірними різцями з внутрішнім тепловідведенням, встановлення аналітичних залежностей та розробка рекомендацій для визначення оптимальних режимів різання.

Виклад основного матеріалу

На першому етапі були проведені однофакторні стійкісні дослідження відносного поверхневого зносу $h_{в.п}=f(v)$ (при постійних подачі та глибині різання) з паралельним вимірюванням температури різання, які дозволили встановити діапазони режимів рі-

зання, де можуть бути визначені оптимальні температури різання при обробці сталі 12Х18Н9Т твердими сплавами Т15К6 та ВК6.

На другому етапі дослідження проводились за методикою повного факторного експерименту типу ПФЕ-2^K [7]. За параметр оптимізації Y була прийнята температура різання θ, в якості факторів, що варіювались, були прийняті: X_1 – глибина різання t; X_2 – подача S та X_3 – швидкість різання V. Числові значення рівнів факторів варіювання наведено в табл. 1 та 2.

Таблиця 1

Рівні варіювання факторів для твердого сплаву Т15К6

Рівні факторів	Режими різання		
	t, мм	S, мм/об	V, м/хв
Середній (0)	0.5	0.25	150
Верхній (+)	0.9	0.4	200
Нижній (-)	0.1	0.1	100

Таблиця 2

Рівні варіювання факторів для твердого сплаву ВК6

Рівні факторів	Режими різання		
	t, мм	S, мм/об	V, м/хв
Середній (0)	0.5	0.25	100
Верхній (+)	0.9	0.4	160
Нижній (-)	0.1	0.1	40

Матриця планування повного факторного експерименту типу 2^3 з ефектом взаємодії наведена у табл.3.

Таблиця 3

Матриця планування експерименту типу 2^3

№	X0	X1	X2	X3	X12	X13	X23	X123
1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1
2	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1
3	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1
4	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1
5	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1
6	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1
7	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1
8	1	1	1	1	1	1	1	1
1_0	-	0	0	0	0	0	0	0
2_0	-	0	0	0	0	0	0	0
3_0	-	0	0	0	0	0	0	0
4_0	-	0	0	0	0	0	0	0

В якості математичної моделі (ММ) прийнята лінійна математична модель. Уточнення типу моделі (лінійна або нелінійна) виконується при аналізі значимості коефіцієнтів регресії та перевірці адекватності моделі.

Механізм впливу режимів різання на температуру різання достатньо добре вивчений, тому очікувана математична модель матиме наступний вигляд:

$$\theta = C_\theta \cdot t^m \cdot s^n \cdot V^p. \quad (1)$$

Для визначення постійних коефіцієнтів виконаємо логарифмування наведеної емпіричної залежності:

$$\ln\theta = \ln C + m\ln t + n\ln s + p\ln V + d\ln t\ln s + f\ln t\ln V + k\ln s\ln V + r\ln t\ln s\ln V. \quad (2)$$

Введемо позначення: Фактори:

$$\ln\theta = y \quad \begin{vmatrix} \ln C = b_0 & d = b_{12} & \ln t = \tilde{X}_1 \\ m = b_1 & f = b_{13} & \ln S = \tilde{X}_2 \\ w = b_2 & k = b_{23} & \ln V = \tilde{X}_3 \\ p = b_3 & r = b_{123} & \end{vmatrix}$$

Рівняння математичної моделі у натуральному масштабі буде мати наступний вигляд:

$$Y = b_0 + b_1\tilde{X}_1 + b_2\tilde{X}_2 + b_3\tilde{X}_3 + b_{12}\tilde{X}_1\tilde{X}_2 + b_{13}\tilde{X}_1\tilde{X}_3 + b_{23}\tilde{X}_2\tilde{X}_3 + b_{123}\tilde{X}_1\tilde{X}_2\tilde{X}_3. \quad (3)$$

Для переходу від натурального до нормованого масштабу виконаємо кодування значень X_1, X_2, X_3 за наступними формулами:

$$X_i = \frac{\tilde{X}_i - \tilde{X}_{i0}}{\Delta\tilde{X}_i}, \quad (4)$$

де X_i – кодоване значення фактора (у нормованому масштабі);

i – номер фактора;

$\tilde{X}_i$ – поточне значення фактора (у натуральному масштабі);

$\tilde{X}_{i0}$ – значення фактора на основному рівні (у натуральному масштабі);

$\Delta\tilde{X}_i$ – інтервал варіювання фактора (у натуральному масштабі), що обчислюється за формулою:

$$\Delta\tilde{X}_i = \frac{\tilde{X}_{i\max} - \tilde{X}_{i\min}}{2}, \quad (5)$$

де $\tilde{X}_{i\max}$ – значення верхнього рівня фактора;

$\tilde{X}_{i\min}$ – значення нижнього рівня фактора;

Рівняння математичної моделі у нормованому масштабі буде мати наступний вигляд:

$$\hat{Y} = b_o + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{23}X_2X_3 + b_{123}X_1X_2X_3. \quad (6)$$

При цьому фактори мають безрозмірний вигляд, а їх значення прийняті (+1) – верхній рівень, (-1) – нижній рівень і (0) – середній (основний) рівень, що значно спрощує розрахунок коефіцієнтів регресії.

Для переходу до аналітичної функції у вигляді рівняння (2) виконаємо перетворення кодованих значень факторів у натуральне значення за формулою:

$$X_i = \frac{\ln\tilde{X}_i - \ln\tilde{X}_{i0}}{\ln\Delta\tilde{X}_i}, \quad (7)$$

де X_i – нормоване значення фактора; $\ln\tilde{X}_i$ – логарифм поточного значення фактора; $\ln\tilde{X}_{i0}$ – логарифм значення фактора на основному рівні; $\ln\Delta\tilde{X}_i$ – логарифм інтервалу варіювання фактору.

Після проведення перетворень отримаємо формулу:

$$y = b_0 + b_1 \frac{\ln X_1 - \ln X_{01}}{\ln \Delta X_1} + b_2 \frac{\ln X_2 - \ln X_{02}}{\ln \Delta X_2} + b_3 \frac{\ln X_3 - \ln X_{03}}{\ln \Delta X_3} +$$
$$+ b_{12} \frac{\ln X_1 - \ln X_{01}}{\ln \Delta X_1} \cdot \frac{\ln X_2 - \ln X_{02}}{\ln \Delta X_2} + b_{13} \frac{\ln X_1 - \ln X_{01}}{\ln \Delta X_1} \cdot \frac{\ln X_3 - \ln X_{03}}{\ln \Delta X_3} + \quad (8)$$
$$+ b_{23} \frac{\ln X_2 - \ln X_{02}}{\ln \Delta X_2} \cdot \frac{\ln X_3 - \ln X_{03}}{\ln \Delta X_3} + b_{123} \frac{\ln X_1 - \ln X_{01}}{\ln \Delta X_1} \cdot \frac{\ln X_2 - \ln X_{02}}{\ln \Delta X_2} \cdot \frac{\ln X_3 - \ln X_{03}}{\ln \Delta X_3}.$$

Після проведення перетворень із формули (8) отримаємо формули для розрахунку коефіцієнтів для рівняння (2):

$$C = b_0 + b_1 \frac{\ln X_{01}}{\ln \Delta X_1} + b_2 \frac{\ln X_{02}}{\ln \Delta X_2} + b_3 \frac{\ln X_{03}}{\ln \Delta X_3} + b_{12} \frac{\ln X_{01}}{\ln \Delta X_1} \frac{\ln X_{02}}{\ln \Delta X_2} +$$
$$+ b_{13} \frac{\ln X_{01}}{\ln \Delta X_1} \frac{\ln X_{03}}{\ln \Delta X_3} + b_{23} \frac{\ln X_{02}}{\ln \Delta X_2} \frac{\ln X_{03}}{\ln \Delta X_3} + b_{123} \frac{\ln X_{01}}{\ln \Delta X_1} \frac{\ln X_{02}}{\ln \Delta X_2} \frac{\ln X_{03}}{\ln \Delta X_3}. \quad (9)$$

$$m = \frac{b_1}{\ln \Delta X_1} + \frac{b_{12}}{\ln \Delta X_1} \frac{\ln X_{02}}{\ln \Delta X_2} + \frac{b_{13}}{\ln \Delta X_1} \frac{\ln X_{03}}{\ln \Delta X_3} + \frac{b_{123}}{\ln \Delta X_1} \frac{\ln X_{02}}{\ln \Delta X_2} \frac{\ln X_{03}}{\ln \Delta X_3} \quad (10)$$

$$n = \frac{b_2}{\ln \Delta X_2} + \frac{b_{12}}{\ln \Delta X_2} \frac{\ln X_{01}}{\ln \Delta X_1} + \frac{b_{23}}{\ln \Delta X_2} \frac{\ln X_{03}}{\ln \Delta X_3} + \frac{b_{123}}{\ln \Delta X_2} \frac{\ln X_{01}}{\ln \Delta X_1} \frac{\ln X_{03}}{\ln \Delta X_3} \quad (11)$$

$$p = \frac{b_3}{\ln \Delta X_3} + \frac{b_{13}}{\ln \Delta X_3} \frac{\ln X_{01}}{\ln \Delta X_1} + \frac{b_{23}}{\ln \Delta X_3} \frac{\ln X_{02}}{\ln \Delta X_2} + \frac{b_{123}}{\ln \Delta X_3} \frac{\ln X_{01}}{\ln \Delta X_1} \frac{\ln X_{02}}{\ln \Delta X_2} \quad (12)$$

$$d = b_{12} \frac{1}{ln \Delta X_1} \frac{1}{ln \Delta X_2} + b_{123} \frac{1}{ln \Delta X_1} \frac{1}{ln \Delta X_2} \frac{ln X_{03}}{ln \Delta X_3} \quad (13)$$

$$f = b_{13} \frac{1}{ln \Delta X_1} \frac{1}{ln \Delta X_3} + b_{123} \frac{1}{ln \Delta X_1} \frac{1}{ln \Delta X_3} \frac{ln X_{02}}{ln \Delta X_2} \quad (14)$$

$$k = b_{23} \frac{1}{ln \Delta X_2} \frac{1}{ln \Delta X_3} + b_{123} \frac{1}{ln \Delta X_2} \frac{1}{ln \Delta X_3} \frac{ln X_{01}}{ln \Delta X_1} \quad (15)$$

$$r = b_{123} \frac{1}{ln \Delta X_1} \frac{1}{ln \Delta X_1} \frac{1}{ln \Delta X_1} \quad (16)$$

Досліди проводили на токарно-гвинторізному верстаті моделі 16К20 при зовнішньому поздовжньому точінні заготовок із сталі 12Х18Н9Т (160...170 НВ, $\sigma_в$= 600 МПа). Діаметр заготовок знаходився у межах D = 101…120 мм, довжина заготовок становила 250 мм. Закріплення заготовок на верстаті здійснювалось по циліндричній поверхні запресованої оправки з упором по торцю у трьохкулачковому патроні. Другим кінцем заготовка опиралась центровим отвором на центр задньої бабки верстата.

Точіння здійснювалося експериментальним різцем з внутрішнім тепловідведенням. Різець оснащувався багатогранними різальними пластинами типу 10114-110408 ГОСТ 19065-80 із твердих сплавів марок ВК6 та Т15К6. Геометричні параметри різців: $\varphi = 45^o$, $\varphi_1 = 27^o$, $\gamma = 5^o$, $\alpha = \alpha_1 = 7^o$, $\lambda = 5^o$, r =1 мм.

Режими різання при проведенні дослідів встановлювались згідно з таблицею рівнів факторів (табл. 1 і 2) та матриці планування (табл. 3) – стовпці X_1, X_2 та X_3.

Температура різання вимірювалася методом природної термопари. Заготовка ізолювалась від кулачків токарного патрона з допомогою діелектричних підкладок і діелектричної вставки, якою заготовка опиралась на центр задньої бабки верстата. При вимірюваннях температури різання рухомий контакт притискався до різальної пластини пружиною. Рухомі контакти, як і різальні пластини, були виготовлені із твердих сплавів марок ВК6 та Т15К6, що перешкоджало утворенню паразитних термопар.

Різець, на відміну від класичного методу, не ізолювався від різцетримача верстата, оскільки при наявності діелектричних підкладок не можливо було оцінити реальний вплив внутрішнього тепловідведення на температуру різання. У зв'язку з цим вимірювання термо-ЕРС здійснювалось з інтервалом 30…40 с, короткочасним притисканням на 3...5 з рухомого контакту до різальної пластини. Після стабілізації показників мілівольтметра важіль з рухомим контактом відводився від різальної пластини і утримувався фіксатором, що перешкоджало його нагріванню і появі паразитних термо-ЕРС.

Для вимірювання термо-ЕРС був використаний мілівольтметр МП-18 кл.1 з вхідним опором 2,5 кОм. Ціна поділки шкали мілівольтметра складала 0,5 мВ, діапазон шкали складав 0...45 мВ. Тарування термопар "12Х18Н9Т–ВК6" та "12Х18Н9Т–Т15К6" здійснювалося стандартними методами [9].

Для розрахунку коефіцієнтів регресії був використаний метод найменших квадратів (МНК). Умова МНК записується наступним чином:

$$U = \sum_{i=1}^{N} \xi_i^2 = min. \tag{17}$$

Формули для розрахунку коефіцієнтів регресії можна записати в такому вигляді:

$$b_0 = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} y_i \,;\; b_j = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} y_i X_{ji} \,;\; b_{uj} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} y_i X_{ui} X_{ji}\,, \tag{18}$$

де N – загальне число дослідів; y_i – параметр відгуку в i-тій точці; X – кодоване значення фактора; i – номер досліду (рядка у матриці планування); j=u=0,1,2,…k – номера факторів.

Дисперсію повторюваності дослідів визначимо за формулою:

$$S_0^2 = \frac{1}{n-1}\sum_{q=1}^{n}\left(y_q - \bar{y}\right)^2, \tag{19}$$

де n – кількість повторюваних дослідів; y_q – параметр відгуку; $\bar{y}$ – середнє арифметичне відхилення параметру відгуку

$$\bar{y} = \frac{1}{n}\sum_{q=1}^{n} y_q\,, \tag{20}$$

де q=1,2,…n – номер паралельного досліду.

Виконаємо перевірку значимості коефіцієнтів регресії, попередньо визначивши довірчий інтервал коефіцієнтів. Для всіх коефіцієнтів регресії довірчі інтервали рівні між собою, і визначаються за формулою:

$$\Delta b_j = \pm t\sqrt{\frac{S_0^2}{N}}\,, \tag{21}$$

де t – табличне значення критерію Стьюдента при заданому рівні значимості α та відповідному числі ступенів вільності.

Рівень значимості приймався α=5 %.

Число ступенів вільності для дисперсії повторюваності визначимо за формулою:

$$f_1 = n - 1, \tag{22}$$

де n – число повторних дослідів; 1 – число ступенів вільності використаних при розрахунку середнього арифметичного для параметру відгуку.

Коефіцієнт регресії значимий, якщо його абсолютна величина більша ніж довірчий інтервал.

Перевірка адекватності моделі проводилася за F-критерієм Фішера:

$$F = \frac{S_{ad}^2}{S_0^2}, \tag{23}$$

де S_{ad}^2 – дисперсія адекватності,

$$S^2_{ad} = \frac{\sum_{i=1}^{N}(y_i - \bar{y})^2}{f_2}, \quad (24)$$

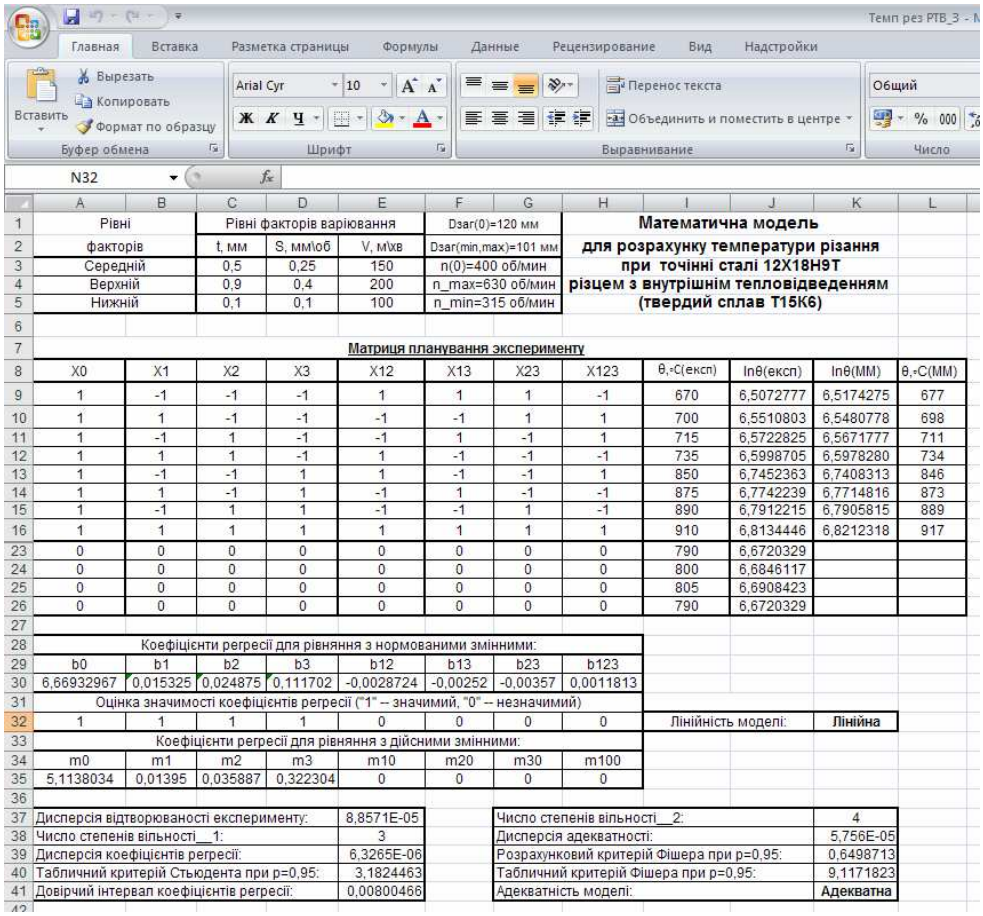
де f_2 – число ступенів вільності для дисперсії адекватності, рівне числу різних дослідів, результати яких використовуються при розрахунку коефіцієнтів регресії, мінус число коефіцієнтів, що визначаються;

$$f_2 = N - (k+1), \quad (25)$$

де N – загальне число дослідів; k – число факторів експерименту.

Рівень значимості, як і в попередньому випадку, приймаємо α=5 %. Модель можна вважати адекватною, якщо розрахункове значення F-критерію Фішера не перевищує табличного значення.

На основі наведеного алгоритму було розроблено програму для розрахунку коефіцієнтів регресії для розроблених математичних моделей у нормованому і натуральному масштабах, а також виконання перевірки на адекватність отриманих математичних моделей (рис. 1). Програма розроблена з використанням програмного забезпечення Microsoft Excel.



1	Рівні		Рівні факторів варіювання			Dsar(0)=120 мм		Математична модель				
2	факторів		t, мм	S, мм\об	V, м\хв	Dsar(min,max)=101 мм		для розрахунку температури різання				
3	Середній		0,5	0,25	150	n(0)=400 об/мин		при точінні сталі 12Х18Н9Т				
4	Верхній		0,9	0,4	200	n_max=630 об/мин		різцем з внутрішнім тепловідведенням				
5	Нижній		0,1	0,1	100	n_min=315 об/мин		(твердий сплав Т15К6)				
6												
7	Матриця планування експерименту											
8	X0	X1	X2	X3	X12	X13	X23	X123	θ,°C(експ)	lnθ(експ)	lnθ(ММ)	θ,°C(ММ)
9	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	670	6,5072777	6,5174275	677
10	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	700	6,5510803	6,5480778	698
11	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	715	6,5722825	6,5671777	711
12	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	735	6,5998705	6,5978280	734
13	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	850	6,7452363	6,7408313	846
14	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	875	6,7742239	6,7714816	873
15	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	890	6,7912215	6,7905815	889
16	1	1	1	1	1	1	1	1	910	6,8134446	6,8212318	917
23	0	0	0	0	0	0	0	0	790	6,6720329		
24	0	0	0	0	0	0	0	0	800	6,6846117		
25	0	0	0	0	0	0	0	0	805	6,6908423		
26	0	0	0	0	0	0	0	0	790	6,6720329		
27												
28	Коефіцієнти регресії для рівняння з нормованими змінними:											
29	b0	b1	b2	b3	b12	b13	b23	b123				
30	6,66932967	0,015325	0,024875	0,111702	-0,0028724	-0,00252	-0,00357	0,0011813				
31	Оцінка значимості коефіцієнтів регресії ("1" -- значимий, "0" -- незначимий)											
32	1	1	1	1	0	0	0	0	Лінійність моделі:		Лінійна	
33	Коефіцієнти регресії для рівняння з дійсними змінними:											
34	m0	m1	m2	m3	m10	m20	m30	m100				
35	5,1138034	0,01395	0,035887	0,322304	0	0	0	0				
36												
37	Дисперсія відтворюваності експерименту:				8,8571E-05		Число степенів вільності__2:				4	
38	Число степенів вільності__1:				3		Дисперсія адекватності:				5,756E-05	
39	Дисперсія коефіцієнтів регресії:				6,3265E-06		Розрахунковий критерій Фішера при p=0,95:				0,6498713	
40	Табличний критерій Стьюдента при p=0,95:				3,1824463		Табличний критерій Фішера при p=0,95:				9,1171823	
41	Довірчий інтервал коефіцієнтів регресії:				0,00800466		Адекватність моделі:				Адекватна	

Рис. 1. Загальний вигляд інтерфейсу програми розрахунку коефіцієнтів регресії та перевірки на адекватність отриманої математичної моделі

У результаті розрахунків були отримані апроксимуючі поліноми:

$$\hat{Y}_{\text{Т15К6}} = 6{,}669 + 0{,}015X_1 + 0{,}025X_2 + 0{,}112X_3 - 0{,}0028\,X_1X_2 - \\ - 0{,}0025X_1X_3 - 0{,}0036X_2X_3 + 0{,}0012X_1X_2X_3 \quad (26)$$

$$\hat{Y}_{\text{ВК6}} = 6{,}612 + 0{,}020X_1 + 0{,}033X_2 + 0{,}124X_3 - 0{,}001\,X_1X_2 + \\ + 0{,}0008X_1X_3 - 0{,}0009X_2X_3 + 0{,}004X_1X_2X_3 \quad (27)$$

Значимість коефіцієнтів регресії визначимо із врахуванням величини довірчого інтервалу Δb_j. За результатами розрахунків можна зробити висновок, що при використанні сплаву Т15К6 (при Δb_j = 0,008) значимими є коефіцієнти регресії: b_0 = 6,669, b_1 = 0,015, b_2 = 0,025 та b_3 =0,112. При використанні сплаву ВК6 (при Δb_j = 0,005) значимими будуть коефіцієнти регресії: b_0 = 6,612, b_1 = 0,020, b_2 = 0,033 та b_3 =0,124. Решта коефіцієнтів регресії не значима, оскільки їх значення менше величини довірчого інтервалу.

Отримані математичні моделі є адекватними, оскільки за результатами розрахунку значення *F*-критерію Фішера становлять F_p=0,65 при використанні сплаву Т15К6 та F_p=0,69 при використанні сплаву ВК6, що значно менше табличного значення $F_т$=9,12.

Після розшифровки математичних моделей була отримана залежність температури різання від глибини різання, подачі та швидкості різання:

- для сплаву Т15К6 $\theta = e^{5{,}114}\, t^{0{,}014}\, S^{0{,}036}\, V^{0{,}322}$ (28)
- для сплаву ВК6 $\theta = e^{5{,}867}\, t^{0{,}018}\, S^{0{,}048}\, V^{0{,}179}$ (29)

У результаті можна навести остаточні значення постійних коефіцієнтів C_θ та показників степені m, n та p у формулі (1) для розрахунку температури різання при точінні різцем з внутрішнім тепловідведенням:

- для сплаву Т15К6 - C_θ = 166,3; m = 0,014, n = 0,036, p = 0,322;
- для сплаву ВК6 - C_θ = 353,2; m = 0,018, n = 0,048, p = 0,179.

Відхилення розрахованих значень температури різання від експериментальних даних не перевищує 2 %.

Подальші розрахунки температури різання при точінні сталі 12Х18Н9Т різцем з внутрішнім тепловідведенням, оснащеним різальними пластинами із твердих сплавів марок ВК6 та Т15К6, були виконані за допомогою програмного забезпечення MachCAD.

Нижче (рис. 2 та 3) наведені алгоритм і результати розрахунку температури різання θ,˚С залежно від параметрів режиму різання при точінні сталі 12Х18Н9Т різцем з внутрішнім тепловідведенням, оснащеним різальною пластиною із твердого сплаву Т15К6. Подача змінювалася у діапазоні S = 0,1…1,1 мм/об, швидкість різання змінювалася у діапазоні V = 100…200 м/хв. Для представлення результатів у вигляді таблиць та графіків значення глибини різання t, мм фіксувалося: t_1 = 0,1 мм, t_2 = 0,25 мм, t_3 = 0,5 мм, t_4 = 1 мм, t_5 = 2 мм, t_6 = 3 мм.

Введення діапазону зміни вхідних параметрів та кроку
сітки для побудови графічних залежностей

ORIGIN := 0 $\quad$ **i** := 0 , 1 .. 20 $\quad$ **j** := 0 , 1 .. 20

t := 0.5 $\quad$ $\mathbf{s_i} := (0.1 + \mathbf{i}\cdot 0.05)$ $\quad$ $\mathbf{v_j} := (100 + \mathbf{j}\cdot 5)$

Коефіцієнти регресії для рівняння з нормованими змінними:

$\mathbf{b_0} := 6.669$ $\mathbf{b_1} := 0.015325$ $\mathbf{b_2} := 0.024875$ $\mathbf{b_3} := 0.111701$

$$\mathbf{W(s,v)} := \mathbf{e}^{\left(\mathbf{b_0}+\mathbf{b_1}\cdot\frac{\ln(\mathbf{t})+0.6931}{1.1284}+\mathbf{b_2}\cdot\frac{\ln(\mathbf{s})+1.3864}{0.6931}+\mathbf{b_3}\cdot\frac{\ln(\mathbf{v})-5.016}{0.3465}\right)}$$

Коефіцієнти регресії для рівняння з дійсними змінними:

$\mathbf{m_0} := 5.114$ $\mathbf{m_1} := 0.014$ $\mathbf{m_2} := 0.036$ $\mathbf{m_3} := 0.322$

$\mathbf{\theta(s,v)} := \mathbf{e}^{\mathbf{m_0}}\cdot\mathbf{t}^{\mathbf{m_1}}\cdot\mathbf{s}^{\mathbf{m_2}}\cdot\mathbf{v}^{\mathbf{m_3}}$ $\quad$ $\mathbf{N_{i,j}} := \mathbf{W}(\mathbf{s_i},\mathbf{v_j})$

$\mathbf{M_{i,j}} := \mathbf{\theta}(\mathbf{s_i},\mathbf{v_j})$

Рис. 2. Алгоритм розрахунку температури різання $\theta_{i,j} = \theta(S_i, V_j)$ при точінні різцем з внутрішнім тепловідведенням (сталь12Х18Н9Т, твердий сплав Т15К6, t = 0,5 мм)

S =

	0
0	0.1
1	0.15
2	0.2
3	0.25
4	0.3
5	0.35
6	0.4
7	0.45
8	0.5
9	0.55
10	0.6
11	0.65
12	0.7
13	0.75
14	0.8
15	0.85
16	0.9
17	0.95
18	1
19	1.05
20	1.1

M =

V

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0	668	679	689	699	708	718	727	736	744	753	761	769	777	785	792	800
1	678	689	699	709	719	728	738	747	755	764	772	781	789	796	804	812
2	685	696	706	716	726	736	745	754	763	772	780	789	797	805	812	820
3	690	701	712	722	732	742	751	760	769	778	787	795	803	811	819	827
4	695	706	717	727	737	747	756	765	774	783	792	800	808	817	824	832
5	699	710	721	731	741	751	760	770	779	788	796	805	813	821	829	837
6	702	713	724	734	745	754	764	773	783	791	800	809	817	825	833	841
7	705	716	727	738	748	758	767	777	786	795	803	812	820	829	837	844
8	708	719	730	740	751	761	770	780	789	798	807	815	823	832	840	848
9	710	722	732	743	753	763	773	782	792	801	809	818	826	835	843	851
10	712	724	735	745	756	766	775	785	794	803	812	820	829	837	845	853
11	715	726	737	747	758	768	778	787	796	805	814	823	831	840	848	856
12	716	728	739	749	760	770	780	789	798	808	816	825	834	842	850	858
13	718	730	741	751	762	772	782	791	800	810	818	827	836	844	852	860
14	720	731	742	753	763	774	783	793	802	811	820	829	838	846	854	862
15	721	733	744	755	765	775	785	795	804	813	822	831	839	848	856	864
16	723	734	746	756	767	777	787	796	806	815	824	833	841	849	858	866
17	724	736	747	758	768	778	788	798	807	816	825	834	843	851	859	867
18	726	737	748	759	770	780	790	799	809	818	827	836	844	853	861	869
19	727	739	750	760	771	781	791	801	810	819	828	837	846	854	862	871
20	728	740	751	762	772	782	792	802	812	821	830	839	847	856	864	872

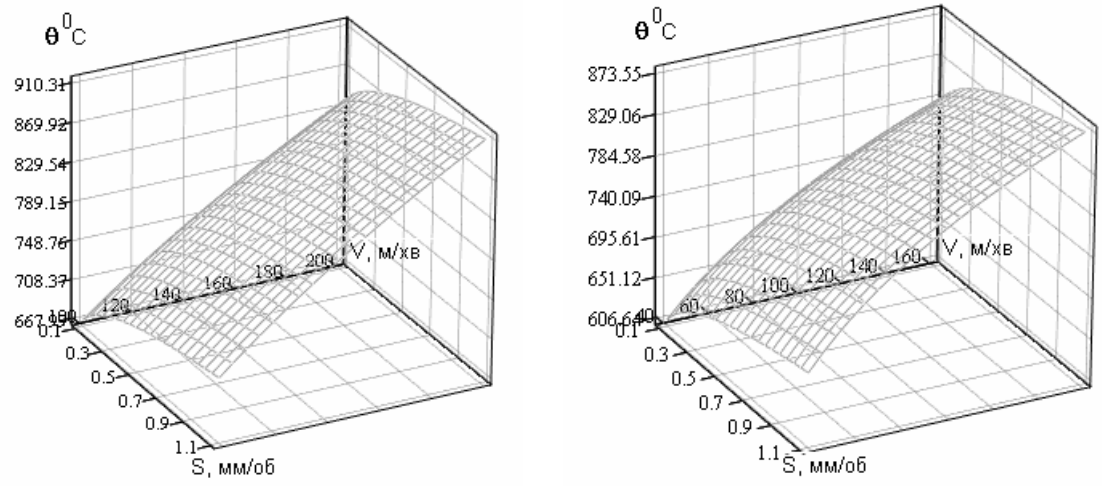
S

v =

	0
0	100
1	105
2	110
3	115
4	120
5	125
6	130
7	135
8	140
9	145
10	150
11	155
12	160
13	165
14	170
15	175
16	180
17	185
18	190
19	195
20	200

Рис. 3. Результати розрахунку температури різання $\theta_{i,j} = \theta(S_i, V_j)$ при точінні різцем з внутрішнім тепловідведенням (сталь12Х18Н9Т, твердий сплав Т15К6, t = 0,5 мм)

Стовпці ***i*** таблиці (рис. 3) відповідають значенням швидкості різання у таблиці **V** (стовпці ***i*** = 16…20 – не показані), рядки ***j*** таблиці відповідають значенням подачі у таблиці **S**. На перетині відповідного рядка та стовпця знаходиться значення температури різання θ,˚С.



а) *б)*

Рис. 4. Графіки залежності температури різання $\theta_{i,j} = \theta(S_i, V_j)$ при точінні різцем з внутрішнім тепловідведенням, оснащеним твердими сплавами Т15К6 (а) та ВК6 (б) (сталь12Х18Н9Т, t = 0,5 мм)

Результати проведених досліджень температури різання дозволяють визначити оптимальні режими різання при точінні сталі 12Х18Н9Т різцями з внутрішнім тепловідведенням.

Відомо [4; 5; 10], що глибина різання головним чином залежить від стадії обробки та розмірів заготовки, тому в процесі досліджень були прийняті наступні значення: чорнова стадія – t = 3,0 мм, напівчистова стадія – t = 1,0…2,0 мм, чистова стадія – t = 0,25…1,0 мм, кінцева стадія – t = 0,1…0,25 мм.

Слід відмітити, що вплив глибини різання на температуру різання набагато менший, ніж швидкості різання та подачі, оскільки показники степені *m* у формулі (1) значно менші ніж *n* та *p*.

Призначення подачі при чорновій стадії обробки здійснюється залежно від жорсткості технологічної системи (діаметра заготовки та перерізу державки різця). При напівчистовій, чистовій та кінцевих стадіях обробки подача призначається залежно від шорсткості обробленої поверхні та радіуса при вершині різця. Тому головним завданням при визначенні оптимальних умов обробки є встановлення оптимальних швидкостей різання, при яких забезпечується мінімальна величина відносного поверхневого зносу $h_{в.п}$, мкм/0,1м^2. Попередніми дослідженнями було встановлено, що точки мінімуму на кривих $h_{в.п}=f(v)$ відповідають значенням оптимальних швидкостей різання, для яких існує відповідне значення оптимальної температури різання.

Виходячи з цього, підставивши у формулу (1) значення оптимальної температури різання θ_o, отримаємо:

$$\theta_o = C_\theta \cdot t^m \cdot s^n \cdot V^p, \tag{30}$$

тоді оптимальна швидкість різання може бути визначена за формулою:

$$V_o = \left(\frac{\theta_o}{C_\theta \cdot t^m \cdot s^n} \right)^{\frac{1}{p}}, \tag{31}$$

де C_θ – постійний коефіцієнт; m, n, p – показники степені.

Після проведення перетворень отримаємо остаточну формулу для розрахунку оптимальної швидкості різання:

$$V_o = \frac{C_v}{t^x \cdot s^y} \cdot k_v, \tag{32}$$

де C_v – постійний коефіцієнт, x, y – показники степені, K_v – коефіцієнт, що враховує конкретні умови різання.

У цьому випадку можна прийняти, що $K_v = K_{пv}$, де $K_{пv}$ – коефіцієнт, що враховує стан поверхні заготовки.

Оскільки сталь 12Х18Н9Т часто приймається за еталон оброблюваності для важкооброблюваних матеріалів (коефіцієнт $K_{мv}$ =1,0), то для вибору значення коефіцієнта $K_{пv}$ при розрахунках оптимальної швидкості різання для матеріалів цієї групи можна скористатися даними, наведеними у літературі [10, с. 261, табл. 3].

Проведені дослідження дозволили визначити оптимальні температури різання для наступних пар інструментального та оброблюваного матеріалів:

- сталь 12Х18Н9Т- твердий сплав Т15К6 - Θ_o = 800 ^{0}С;
- сталь 12Х18Н9Т- твердий сплав ВК6 - Θ_o = 750 ^{0}С.

Підставимо ці значення у формулу (31) і визначимо значення постійних коефіцієнтів та показників степені у формулі (32) для розрахунку температури різання при точінні різцем з внутрішнім тепловідведенням:

- для сплаву Т15К6 - C_v =131,2; x=0,43; y=0,112;
- для сплаву ВК6 - C_v =68,2; x=0,1; y=0,268.

Аналіз результатів розрахунку дозволив розробити практичні рекомендації для призначення режимів різання при обробці сталі 12Х18Н9Т твердими сплавами марок Т15К6 та ВК8. Рекомендовані режими різання для обробки твердим сплавом Т15К6 наведені у табл. 4.

Промислові випробування збірних токарних різців з внутрішнім тепловідведенням на заводі ТОВ «Черкасиелеватормаш» показали високу ефективність таких інструментів. При обробці деталей із вуглецевих та низьколегованих конструкційних сталей зносостійкість багатогранних твердосплавних пластин збільшилась в 1,2…1,3 рази, а про-

дуктивність обробки деталей зросла на 10…20 % порівняно з різцями стандартизованих конструкцій. Точність та якість обробки поверхонь деталей не змінилась.

Таблиця 4

Рекомендовані режими різання при точінні різцями з внутрішнім тепловідведенням (сталь 12Х18Н9Т,твердий сплав Т15К6)

S, мм/об	Оптимальна швидкість різання V, м/хв.					
	t = 0,1 мм	t = 0,25 мм	t = 0,5 мм	t = 1 мм	t = 2 мм	t = 3 мм
0,1	185	180	175	170	165	160
0,15	180	175	170	165	160	155
0,2	175	165	160	155	155	150
0,25	170	160	160	155	150	145
0,3	165	160	155	150	145	145
0,35	165	155	150	145	145	140
0,4	160	155	150	145	140	140
0,45	160	150	145	145	140	135
0,5	155	150	145	140	140	135
0,6	155	145	140	140	135	130
0,7	150	145	140	135	130	130
0,8	150	140	140	135	130	130
0,9	145	140	135	135	130	125
1,0	145	140	135	130	125	125

При обробці деталей із жароміцних та корозійностійких сталей на рекомендованих режимах різання було досягнуто підвищення зносостійкості багатогранних твердосплавних пластин в 1,5…1,8 рази та продуктивності обробки деталей на 30…50 % порівняно з різцями стандартизованих конструкцій. Разом з цим було досягнуто покращення точності та якості обробки поверхонь деталей на 15…20 %. При цьому кращі результати були отримані при використанні сплавів Т15К6 та Т14К8, оптимальні швидкості різання для яких були більшими на 25…30 %, ніж для сплавів ВК6 та ВК8.

Висновки

1. Розроблена методика дозволила дослідити вплив умов обробки на температуру різання при точінні збірними різцями з внутрішнім тепловідведенням.
2. Запропонований алгоритм та розроблена програма для статистичної обробки експериментальних даних.
3. Отримані аналітичні залежності для розрахунку температури різання та оптимальних швидкостей різання.
4. Розроблені практичні рекомендації для призначення режимів різання при обробці сталі 12Х18Н9Т твердими сплавами марок Т15К6 та ВК8.
5. Наведені результати промислових випробувань збірних токарних різців з внутрішнім тепловідведенням свідчать про перспективність застосування таких інструментів для обробки деталей із жароміцних та корозійностійких сталей.

Список використаних джерел

1. Кальченко В. В. Моделювання теплового поля збірних токарних різців з оптимально-орієнтованими непереточуваними пластинками в T-FLEX CAD 3D / В. В. Кальченко, Ю. Д. Юрченко // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія “Технічні науки”. – Чернігів: ЧДТУ, 2011. – № 3 (51). – С. 48-52.
2. Кальченко В. В. Обробка аустенітних сталей токарними різцями з внутрішнім тепловідведенням / В. В. Кальченко, Ю. Д. Юрченко // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія “Технічні науки”. – Чернігів: ЧДТУ, 2011. – № 4 (53). – С. 79-85.

3. Компьютерное моделирование и оптимизация процессов резания: учебное пособие / С. И. Пестрецов. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2009. – 104 с.

4. Основи теорії різання матеріалів: підручник для вищ. навч. закладів / М. П. Мазур, Ю. М. Внуков, В. Л. Доброскок, Ю. К. Залога [та ін.]. – Львів: Новий Світ-2000, 2010. – 422 с.

5. Макаров А. Д. Оптимизация процессов резания / А. Д. Макаров. – 2-е изд. – М.: Машиностроение, 1976. – 278 с.

6. Мироненко В. В. Збірні токарні різці з внутрішнім тепловідводом / В. В. Мироненко, Ю. Д. Юрченко // Вісник ЧДТУ. – Черкаси, 2002. – № 2. – С.97-104.

7. Научные исследования в технологии машиностроения: учебное пособие / В. А. Ванин, В. Г. Однолько, С. И. Пестрецов, В. Х. Фидаров, А. Н. Колодин. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2009. – 232 с.

8. Резников А. Н. Тепловые процессы в технологических системах / А. Н. Резников, Л. А. Резников – М.: Машиностроение, 1991. – 288 с.

9. Слободяник П. Т. Методы и средства контроля температуры при механической обработке / П. Т. Слободяник // Машиностроит. пр-во. Сер. Технология и оборудование обработки металлов резанием: Обзор информ. ВНИИТЭМР. – М., 1990. – Вып. 2. – 36 с.

10. Справочник технолога-машиностроителя: в 2-х томах. Т.2 / под ред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова. – М.: Машиностроение, 1985.

РОЗДІЛ ІІІ. ТЕХНОЛОГІЇ ЗВАРЮВАННЯ

УДК 621.791.3

М.Г. Болотов, канд. техн. наук
Т.Р. Ганєєв, канд. техн. наук
Чернігівський державний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

ЕФЕКТИВНІСТЬ НАГРІВУ ПРИ ЗВАРЮВАННІ В ТЛІЮЧОМУ РОЗРЯДІ З ПОРОЖНИСТИМ КАТОДОМ

Досліджено енергетичну ефективність нагрівання деталей при зварюванні в плазмі тліючого розряду, що горить у порожнистому катоді.

Постановка проблеми

При зварюванні в нормальному тліючому розряді здійснюється прямий нагрів деталей, які одночасно виконують роль катода розряду, в результаті безпосереднього перетворення на їх поверхні електричної енергії, що виділяється в розряді, в теплову в процесі бомбардування їх поверхні прискореними позитивними іонами газу і передачею через тонкий прикатодний шар частини енергії (до 60 %) позитивного стовпа розряду [1; 2].

Сумарна дія на катоді двох джерел теплоти забезпечує нагрів з досить високим ефективним ККД (коефіцієнтом корисної дії), що досягає 0,7...0,85.

Механізм нагріву в тліючому розряді з порожнистим катодом (ТРПК) істотно відрізняється і визначається особливостями існування ефекту порожнистого катода.

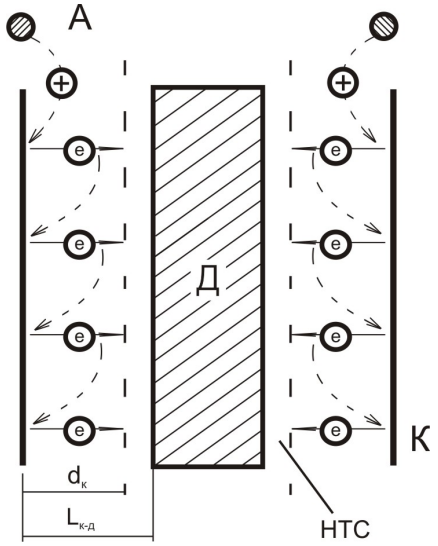
Деталі, що зварюються, розміщують в області негативного тліючого свічення, шари якого частково перекриваються. В результаті перекриття катодних областей протяжність їх зменшується, що призводить до підвищення напруженості електричного поля в зоні темного катодного простору d_k. Зростання напруженості поля на ділянці d_k пов'язане з підвищенням інтенсивності іонізації в темному катодному просторі і, отже, з посиленням потоку іонів, які бомбардують катод і викликають вторинну емісію з нього електронів, які, у свою чергу, бомбардують поверхню деталі. Це призводить до посилення (у порівнянні з нормальним тліючим розрядом) електронної складової струму з порожнистого катода.

У ході розряду іони приходять до катода не самі, а разом з квантами променистої енергії (фотонами), що виділяються в процесі рекомбінації в області тліючого свічення. Віддача всіма частками своєї потенційної і кінетичної енергії катоду підвищує результуючу емісію в порівнянні з емісією, що створюється лише іонами.

Оскільки кількісно врахувати кількість фотонів, що досягають катода, неможливо, то зазвичай прийнято усі електрони, що емітуються катодом, відносити умовно лише до дії іонів.

Стосовно розряду з порожнистим катодом таке припущення є тим більш справедливим, оскільки він існує при порівняно низьких тисках газу, що не перевищують 0,1 кПа, а при зниженні тиску газу фотонна складова на катоді стає малозначимою [3].

Таким чином, можна вважати, що нагрів деталей при зварюванні в тліючому розряді з порожнистим катодом здійснюється в результаті бомбардування їх поверхні електронами, що вилітають з поверхні порожнистого катода унаслідок іонно-електронної емісії під дією іонного бомбардування (рис. 1).



А – анод; К – катод; Д – деталь; + – іони робочого газу; е – емітовані з поверхні катоду електрони; НТС – область негативного тліючого свічення; $d_к$ – область темного катодного простору; $L_{к-д}$ – відстань катод-деталь

Рис. 1. Схема нагріву в ТРПК

Постановка завдання

Метою роботи є дослідження енергетичних характеристик тліючого розряду з порожнистим катодом в умовах зварювання.

Виклад основного матеріалу дослідження

Величину ефективного ККД нагріву в тліючому розряді з порожнистим катодом визначали експериментально. При цьому корисними вважали теплоту, що акумулюється деталлю за час нагріву, і теплоту, втрачену деталлю за допомогою різних механізмів тепловідводу.

Теплота, що акумулюється деталлю в процесі нагрівання, визначається її геометриними і теплофізичними характеристиками і може бути знайдена із співвідношення:

$$q_д = c\rho v\frac{\Delta T}{\Delta \tau}, \qquad (1)$$

де с – питома теплоємність матеріалу деталі, $\frac{дж}{кг \cdot К}$;

ρ – густина матеріалу, $\frac{кг}{м^3}$;

v – об'єм деталі, $м^3$;

ΔТ – зміна температури деталі за час нагріву, К;

Δτ – тривалість нагріву, с.

Теплові втрати в системі катод-деталь складаються з тепловіддачі з поверхні деталі за допомогою випромінювання і теплообміну між цією поверхнею та нагрітим газом у проміжку між деталлю і катодом за допомогою конвекції або теплопровідності газу.

Для оцінки ролі цих втрат одночасно з нагрівом деталі здійснювали контроль температури катода і температури газу в області темного катодного простору. Для виміру температури катода до нього конденсаторним зварюванням приварювалася хромель-алюмелева термопара. Така ж термопара встановлювалася посередині проміжку катод-деталь для визначення температури газового середовища.

Термопара закріплювалася в керамічній оболонці і встановлювалася, як показано на (рис. 2) для того, щоб уникнути дії на неї потоку електронів, здатних привести до створення на термопарі заряду і спотворення результатів вимірів.

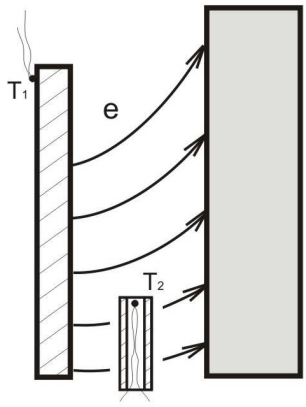


Рис. 2. Схема контролю температурного стану катода Т1 та газового середовища Т2

Результати вимірювань показали, що температури і катода, і газу в процесі нагріву деталі зростають, проте залишаються помітно нижче за температуру деталі. Так, при максимальній температурі деталі (граничний стан) 1073…1123 К температура катода не перевищує 470…520 К, а температура газу в контрольній точці досягає 773...873 К. Очевидно, температура газу в проміжку поступово знижується від температури деталі до температури поверхні порожнистого катода.

Радіаційні втрати випромінюванням з бічної поверхні деталей визначали за законом Стефана-Больцмана:

$$q_u = \varepsilon\sigma_0[\left(\frac{T}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_0}{100}\right)^4]\cdot S_б, \qquad (2)$$

де ε – коефіцієнт чорноти тіла, ε ≈ 0,8 [4];

$\sigma_0 = 5{,}76\ \frac{Вт}{м^2\cdot К^4}$ – постійна Стефана-Больцмана;

Т – температура нагріву деталі, К;

T_0 – температура середовища навколо деталі, в цьому випадку це температура поверхні полого катода, складової в процесі нагріву $T_0 \approx 470...520$ К.

$S_б$ – площа бічної поверхні деталі, м^2.

Оскільки в процесі нагріву температура порожнистого катода і середня температура газу в проміжку катод – деталь істотно нижче за температуру самої деталі, можливі втрати теплоти з її поверхні за допомогою теплопровідності газу, визначались як:

$$q_T = \lambda\frac{T - T_0}{L}S_б, \qquad (3)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності газу, $\frac{Вт}{м\cdot К}$;

Т і T_0 – відповідно, температури деталі і порожнистого катода, К;

L – протяжність проміжку катод – деталь, м.

Розрахунки, виконані згідно з виразами (2) і (3), свідчать, що унаслідок низької теплопровідності газів (при середній температурі газу Т ≈ 773 К коефіцієнт теплопровідності аргону λ = 0,0038 $\frac{Вт}{м\cdot К}$, азоту λ = 0,055 $\frac{Вт}{м\cdot К}$ [5]) останні втрати при температурі деталі Т = 973..1073 К не перевищують 2...4 Вт, що складає менше 10 % від потужності радіаційних втрат.

Величину ефективного ККД нагріву тліючим розрядом з порожнистим катодом визначали за результатами нагріву сталевих і мідних деталей у вигляді стрижнів діаметром 0,008 м і завдовжки 0,04 м, розташованих у вільнопідвішеному стані усередині порожнистого катода з апертурою (діаметром) порожнини 0,02…0,05 м.

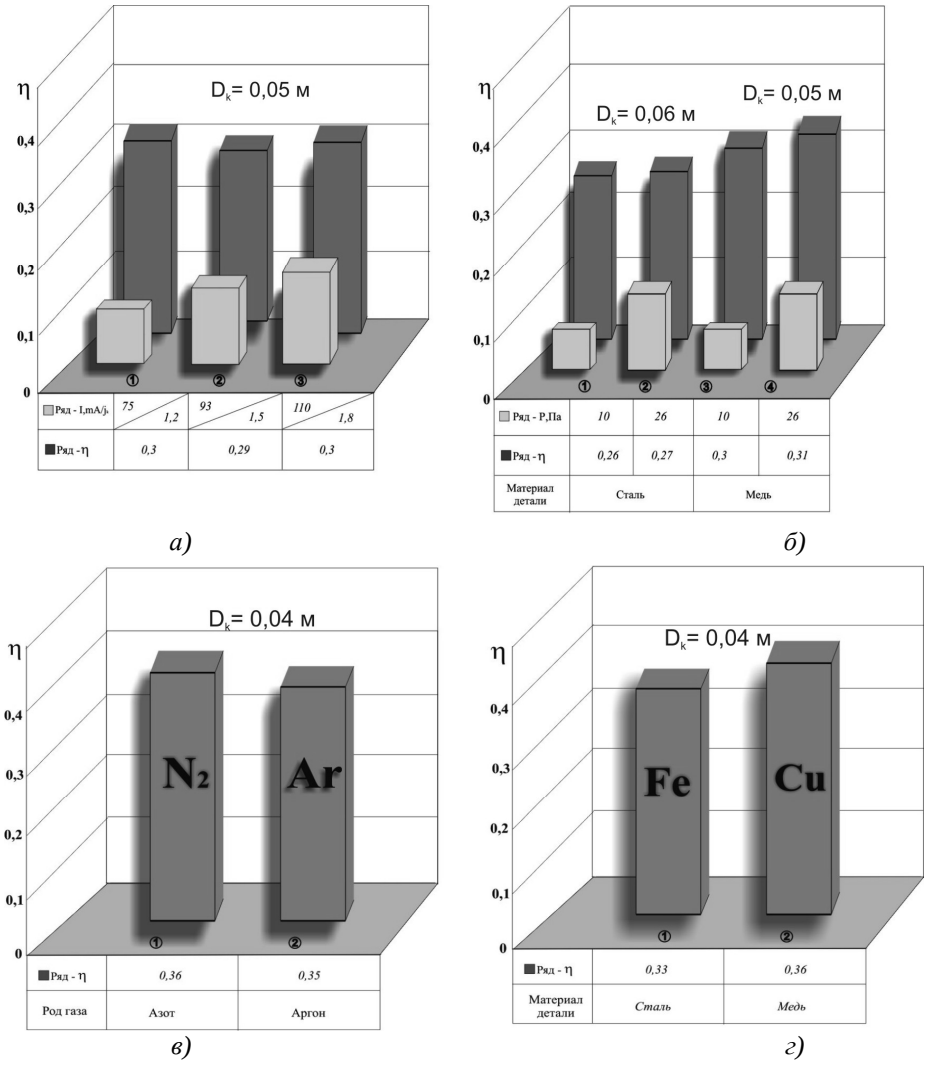
Температурний стан деталей контролювали ХА-термопарою, зачеканеною в одному з торців деталі. Вимір температури проводили через кожних 30 с нагріву до досягнення граничного стану. Останнім вважали таке, при якому температура зростала не більше ніж на 10 К за контрольний проміжок часу.

Струм розряду в експериментах варіювали в межах 35...110 мА, тиск газу (азоту, аргону або залишкового повітряного середовища) встановлювали на рівні 10 Па, 26 Па та 52 Па.

Величину ефективного ККД визначали як відношення:

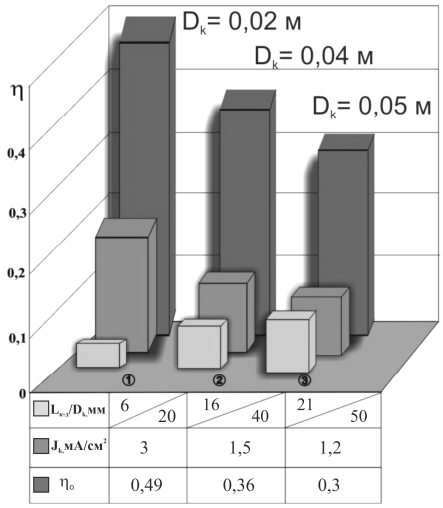
$$\eta_0 = \frac{q_д + q_T + q_u}{q_P} \ . \qquad (4)$$

Результати досліджень, приведені на (рис. 3), показують, що серед усіх параметрів режиму (струму I, його густини J (рис. 3, *а*), тиску газу P (рис. 3, *б*), роду газу (рис. 3, *в*), матеріалу деталі (рис. 3, *г*), діаметра катоду D_k і величини проміжку катод – деталь $L_{к\text{-}д}$ (рис. 3, *д*)) ефективність нагріву найбільш помітно залежить від протяжності проміжку катод – деталь $L_{к\text{-}д}$, яка визначається внутрішнім діаметром катодної порожнини. Із збільшенням цього проміжку величина ефективного ККД істотно знижується, причому ця залежність має близький характер як у разі незмінного струму розряду, так і при незмінній густині струму на катоді. Це може бути пов'язано із збільшенням витрат електронів через відкритий торець катодної порожнини у навколишній простір під впливом двох взаємно перпендикулярних електричних полів, які діють у напрямку катод – деталь (E_1 – в області темного катодного простору) та катод – анод (E_2) (рис. 4).



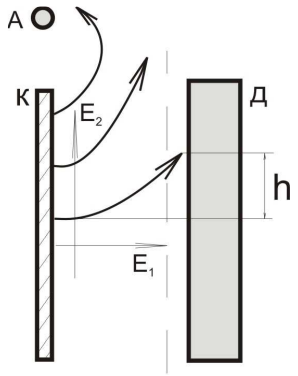
а) *б)*

в) *г)*



д)

Рис.3. Характер впливу основних параметрів режиму нагріву тліючим розрядом з порожнистим катодом на ефективний ККД розряду



К – катод; А – анод; Д – деталь; h – величина зміщення електронів

Рис.4. Траєкторія руху електронів під дією електричних полів Е1 та Е2, діючих у проміжку катод – деталь та катод – анод відповідно

Величину зсуву траєкторії електронів визначали розрахунковим шляхом відповідно за отриманою в процесі теоретичних досліджень аналітичною залежністю:

$$h = \frac{eU}{2md}\left(\frac{l_{к-д}}{V}\right)^2 = \frac{U l_{к-д}^{\ 2}}{4d(U_i - 2\varphi)}, \qquad (5)$$

де U – напруга на розрядному проміжку; U_i – потенціал іонізації атомів (молекул) газу; m, V, e – маса, швидкість і заряд електрона відповідно; φ – робота виходу електронів; d – середня величина проміжку катод-анод.

Результати розрахунків свідчать, що при діаметрі катода 0,02 м та діаметрі деталі 0,008 м (тобто для $L_{к-д}$ = 0,006 м), напрузі 1000…1500 В величина зсуву електронів складає h = 0,025…0,04 м. Збільшення діаметра катода до 0,05 м при тому ж діаметрі деталі (тобто для $L_{к-д}$ = 0,021 м), спричиняє збільшення цієї величини більш ніж на порядок, що в наших дослідах призводило до зменшення величини ефективного ККД з 0,5 до 0,3.

Висновки

1. Встановлено, що величина ефективного ККД нагріву ТРПК залежить, в основному, від протяжності проміжку катод – деталь $l_{к-д}$, що визначається геометричними параметрами системи катод – деталь.

2. Встановлено, що головною причиною зниження ефективності нагріву ТРПК є втрата частини емітованих електронів унаслідок їх відходу через відкриті торці

порожнини катода назовні в результаті викривлення траєкторії їх руху під дією двох взаємно перпендикулярних електричних полів – у темному катодному просторі в проміжку катод – деталь і в проміжку катод – анод.

3. Розрахунковим шляхом визначено, що якщо для $l_{к-д}$ = 0,006 м максимальна величина зсуву траєкторії електронів у бік анода не перевищує 0,02...0,04 м, то для $l_{к-д}$ = 0,021 м величина такого зсуву зростає майже на порядок. Це обумовлює необхідність зниження площі можливих каналів відходу електронів з катодної порожнини, в першу чергу, скороченням відстані між емітуючою поверхнею катода і деталлю.

Список використаних джерел

1. Болотов Г. П. Поверхневий нагрів тліючим розрядом при дифузійному зварюванні / Г. П. Болотов // Вісник ЧДТУ. – 2004. – № 21. – С. 111-119.
2. Болотов Г. П. Тлеющий разряд как источник нагрева в процессах сварки и пайки (обзор) / Г. П. Болотов // Автоматическая сварка. – 2001. – № 8. – С.41-44.
3. Елецкий А. В. Газовый разряд / А. В. Елецкий – М.: Знание, 1981. – 64 с.
4. Лыков А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков – М.: Высшая школа, 1967. – 599 с.
5. Пехович А. И. Расчет теплового режима твердых тел / А. И. Пехович, В. М. Жидких – Л.: Энергия, 1968. – 303 с.

УДК 621.791.4

Г.К. Харченко, д-р техн. наук
Чернігівський державний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

Ю.В. Фальченко, канд. техн. наук
Л.В. Петрушинець, інженер
Ін-т електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, м. Київ, Україна

ДИФУЗІЙНЕ ЗВАРЮВАННЯ У ВАКУУМІ ІНТЕРМЕТАЛІДНОГО СПЛАВУ γ-TiAl ІЗ СПЛАВОМ ТИТАНУ ВТ8

Розроблено технологію дифузійного зварювання у вакуумі інтерметалідного сплаву γ-TiAl із сплавом титану ВТ8. Показано, що використання формуючих матриць сприяє обмеженню пластичної деформації титану й отриманню бездефектних з'єднань.

Постановка проблеми

З розвитком аерокосмічних технологій і появою нових конструкційних жароміцних сплавів виникає необхідність у їхньому зварюванні як в однорідному сполученні, так і різнорідному. До таких пар можна віднести інтерметалідний сплав γ-TiAl, який має структуру γ + α_2, і двофазний сплав титану ВТ8 із структурою α + β.

Відомо, що оптимальними параметрами для дифузійного зварювання сплавів титану є температура $T_{зв}$ = 800 ... 1050 °С, тиск $P_{зв}$ = 1 ... 10 МПа, час $t_{зв}$ до 30 хв [1].

При зварюванні γ-TiAl оптимальним режимом слід вважати температуру $T_{зв}$=1200°С, тиск $P_{зв}$ = 15…40 МПа, час $t_{зв}$ = 20…60 хв [2; 3].

Однак параметри, які визначено як оптимальні при зварюванні сплавів титану, для зварювання інтерметалідних сплавів зі сплавами титану не прийнятні в наслідок значної пластичної деформації титану.

Формування цілей статті

Метою наших досліджень було розробити технологію одержання зварного з'єднання γ-TiAl зі сплавом титану ВТ8.

Методика експерименту

Зварювання інтерметалідного сплаву γ-TiAl (59,2Ti – 33,3Al – 4,8Nb – 2,7Cr мас. %) із сплавом титану ВТ8 (88,4Ti – 3,9Al – 7,6Mo – 0,1Si мас. %) проводили у вакуумі $B_{зв}$ =

$1{,}33 \cdot 10^{-3}$ Па при температурі $T_{зв}$ = 1200 °С, тиску $P_{зв}$ = 20 МПа, часі $t_{зв}$ = 20 хв, швидкість нагрівання складала V = 150 °С/хв. Підготовка зразків під зварювання складалася з розрізання їх на електроерозійному верстаті, шліфування поверхонь, які підлягали зварюванню, і знежирення. Шліфи зварних з'єднань для дослідження мікроструктури виготовляли за стандартною методикою з використанням алмазних паст. Виявлення мікроструктури проводили в суміші плавикової та азотної кислот з додаванням гліцерину. Мікроструктуру досліджували методом оптичної металографії на мікроскопі «Neophot-32». Хімічний склад зони з'єднання та ділянок металу, що прилягали до неї, визначали мікрорентгеноспектральним аналізом за допомогою растрового електронного мікроскопу JSM-840 фірми «JEOL». Мікротвердість структурних складових вимірювали на твердомірі фірми «LECO» навантаженням 50 г.

Виклад основного матеріалу досліджень

Як показали попередні наші дослідження, при зварюванні на режимах, оптимальних для зварювання інтерметалідного сплаву γ-TiAl, відбувається значна пластична деформація сплаву титану ВТ8. Ступінь пластичної деформації зразків із сплаву ВТ8 при 1200 °С складає ~ 40 %.

Аналіз мікроструктури з'єднань, отриманих при значеннях тиску, прийнятих для зварювання сплавів титану ($P_{зв}$ = 5 МПа), показує, що в зоні з'єднання спостерігається значна кількість дефектів. Відомо, що при одержанні біметалічних з'єднань м'яких матеріалів із твердими, котрі значно відрізняються за своїми механічними властивостями, добре зарекомендувала себе схема зварювання у формуючих обоймах [4; 5]. При цій схемі зварювання в зоні з'єднання практично відсутня пористість, що автори пояснюють "текучістю" більш м'якого з металів – міді [5] або титану [4] по поверхні твердого, що в кінцевому підсумку і призводить до забезпечення фізичного контакту.

Для проведення експериментів нами було спроектовано пристрій. На відміну від існуючих конструкцій формуючих пристроїв, які застосовують при зварюванні у твердій фазі [4; 5], у нашій конструкції обмежували пластичну деформацію тільки більш м'якого з матеріалів – сплаву титану ВТ8.

Схему пристрою для зварювання інтерметалідного сплаву γ-TiAl із сплавом ВТ8 представлено на рис. 1. Зразок із сплаву ВТ8 – *1* фіксували в розбірній втулці – *2*, яку вставляли в обойму – *3*. Знизу обойми – *3* знаходиться вкладиш – *4*. За рахунок зміни висоти вкладиша – *4* задавали величину пластичної деформації сплаву ВТ8. Зверху ВТ8 встановлювали інтерметалідний сплав γ-TiAl – *5*.

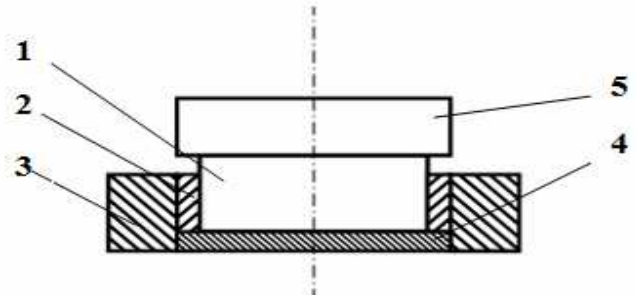


Рис. 1. Схема пристрою для зварювання інтерметалідного сплаву γ-TiAl зі сплавом ВТ8: 1 – зразок із сплаву ВТ8; 2 – розбірна втулка; 3 – обойма; 4 – вкладиш; 5 – зразок з інтерметалідного сплаву γ-TiAl

Металографічними дослідженнями зварних з'єднань встановлено, що після електрохімічного травлення зона з'єднання являє собою чітко виражену смугу товщиною 10-15 мкм (рис. 2, *а*). При вивченні зварного з'єднання за допомогою растрової електронної мікроскопії на не травленому шліфі в зоні з'єднання дефекти зварювання не виявлені (рис. 2, *б*).

Концентрація елементів (мас. %) у зоні з'єднання за даними мікрорентгеноспектрального аналізу складає (рис. 3, т. 1) 66,54Ti – 25,40Al – 6,22Nb – 1,15Cr – 0,69Mo (мас. %).

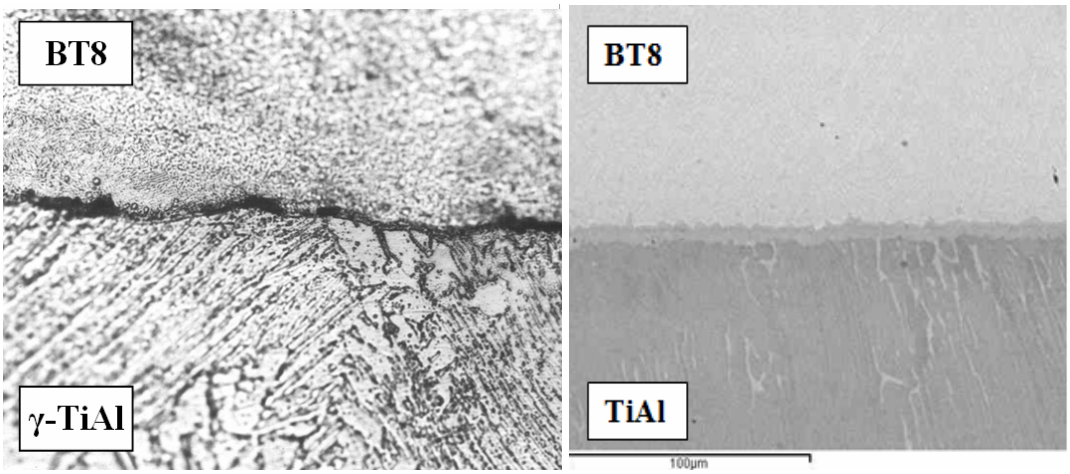
Можна стверджувати, що структура зони з'єднання між інтерметалідом γ-TiAl і сплавом ВТ8 являє собою дуплексну структуру (γ + α_2). На ділянці, що прилягає до зони з'єднання з боку інтерметаліду γ-TiAl (рис. 3, т. 2), концентрація елементів становить: 64,69Ti – 24,27Al – 5,97Nb – 4,28Cr – 0,79Mo (мас. %).

Структура інтерметалідного сплаву γ-TiAl, що прилягає до зони з'єднання (рис. 3, т. 3 і 4), має ламелярну структуру (γ + α_2). У структурі інтерметалідного сплаву спостерігаються пластини світло-сірого кольору, окантовані округлими виділеннями, що містять ніобій. Фаза, що містить ніобій (т. 4), являє собою хімічну сполуку Ti_2AlNb.

Вміст елементів у т. 3 та 4 відповідно дорівнює:

– 62,86Ti – 25,11Al – 7,19Nb – 1,90Mo – 2,94Cr (мас. %);

– 61,58Ti – 29,31Al – 5,48Nb – 0,67Mo – 2,96Cr (мас. %).



а) *б)*

Рис. 2. Вигляд зони з'єднання γ-TiAl – ВТ8: а – оптична мікроскопія, х400; б – растрова електронна мікроскопія, х1000

З боку сплаву ВТ8 до зони з'єднання прилягає безструктурна смуга товщиною 60…80 мкм (рис. 2, *а*). Ділянки, які досліджували (рис. 3, т. 5 і 6), розташовані в сплаві ВТ8 на відстані 30 і 120 мкм від зони з'єднання.

Вміст елементів у т. 5 та 6 відповідно дорівнює:

– 89,78Ti – 3,74Al – 0,84Nb – 4,25Mo – 1,39Cr (мас. %);

– 89,71Ti – 3,65Al – 0,62Nb – 6,02Mo (мас. %).

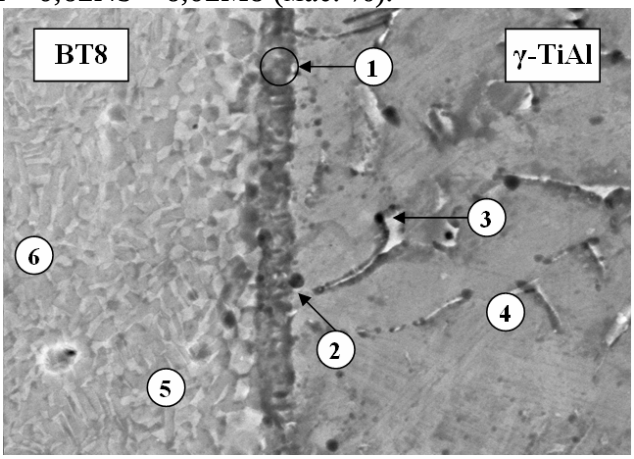


Рис.3. Мікроструктура зони з`єднання γ-TiAl – ВТ8 (растрова електрона мікроскопія), х2000

Характер розподілу елементів поблизу зони з'єднання вказує на дифузію атомів Al і Nb з алюмініду титану в сплав титану та атомів Ti в протилежному напрямку (рис. 4). Дифузійні процеси призводять до збагачення титаном та алюмінієм ділянки, що знаходиться між γ-TiAl і сплавом титану ВТ8. Можна припустити, що зміна концентрації легуючих елементів поблизу від зони з'єднання визначає його структуру і механічні властивості.

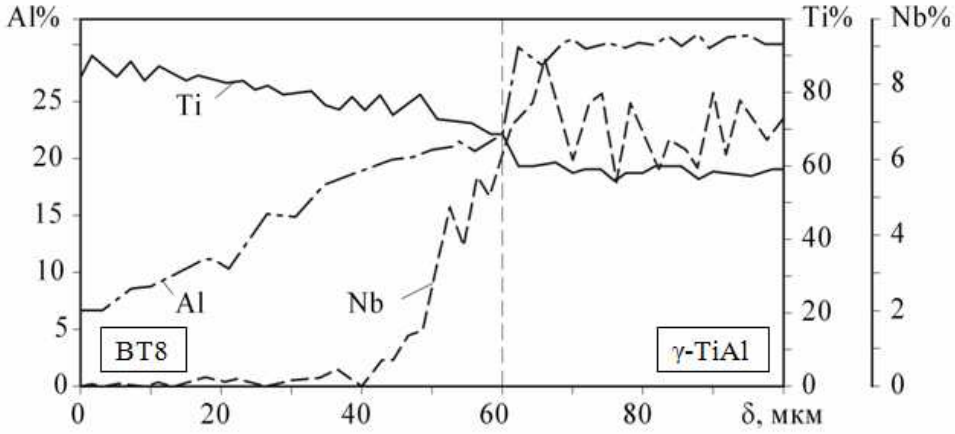


Рис. 4. Характер розподілу Ti, Al і Nb у зоні з'єднання γ-TiAl – ВТ8

Характер розподіл мікротвердості в зоні з'єднання представлено на рис. 5. Отримані результати підтверджують дані мікрорентгеноспектрального аналізу про наявність дифузійної зони з боку сплаву ВТ8.

Механічні випробування зварних з'єднань на зріз показали, що руйнування проходить по зоні з'єднання з присутністю в зламі окремих ділянок інтерметалідного сплаву. Міцність з'єднань на зріз дорівнює 260 МПа, що складає 72 % від міцності інтерметаліду.

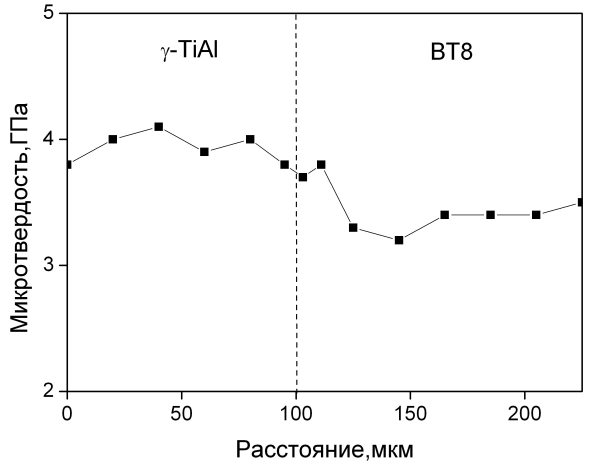


Рис. 5. Розподіл мікротвердості в зоні з'єднання γ-TiAl – ВТ8

Висновки з дослідження

1. Розроблено технологію дифузійного зварювання у вакуумі інтерметалідного сплаву γ-TiAl із сплавом титану ВТ8 із застосуванням формуючих пристроїв.

2. При параметрах режиму зварювання: температура $T_{зв}$ = 1200 °С, тиск $P_{зв}$ = 20 МПа, $t_{зв}$ = 20 хв отримано бездефектні зварні з'єднання.

3. Аналіз мікроструктури показує, що в процесі зварювання в зоні з'єднання формується кілька дифузійних зон з різним вмістом алюмінію, титану і ніобію.

4. Випробування зварних з'єднань на зріз показують, що руйнування проходить по зоні з'єднання з присутністю в зламі окремих ділянок інтерметалідного сплаву. Міцність з'єднань на зріз дорівнює 260 МПа, що складає 72 % від міцності інтерметаліду.

Список використаних джерел

1. Конюшков Г. В. Специальные методы сварки давлением: учебное пособие / Г. В. Конюшков, Р. А. Мусин. – Саратов: Ай Пи Эр Медиа, 2009. – 632 с.
2. Получение неразъемных соединений сплавов на основе γ-TiAl с использованием нанослойной прослойки Ti/Al способом диффузионной сварки в вакууме / А. И. Устинов, Ю. В. Фальченко, А. Я. Ищенко [и др.] // Автоматическая сварка. – 2009. – № 1. – С.17-21.
3. Diffusion Bonding of Intermetallic Compound TiAl / Yoshikuni Nakao, Kenji Shinozaki, Masahiko Hamada // ISIJ International. – 1991. – Vol. 31, № 10. – P. 1260-1266.
4. Киреев Л. С. Сварка в вакууме технического титана со сталями 2Х13 и 12Х18Н10Т / Л. С. Киреев // Автоматическая сварка. – 1985. – № 3. – С. 56-58.
5. Структура соединений титана с медью, выполненных диффузионной сваркой в вакууме, при различных схемах деформирования / Л. Н. Лариков, М. Н. Белякова, В. Н. Замков, В. К. Сабокарь // Автоматическая сварка. – 1982. – № 6. – С. 21-23.

УДК 621.341.572

Д.В. Вайц, аспірант
В.М. Співак, канд. техн. наук
Є.Ю. Коваленко, магістрант
НТУУ «КПІ», м.Київ, Україна

КЕРУВАННЯ ДОЗОВАНОЇ ПОДАЧІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ПІД ЧАС ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ МЕТАЛІВ

Викладено спосіб керування дозованою подачею електроенергії під час дугового зварювання металів з метою зменшення розбризкування крапель зварювального металу, підвищення ККД системи зварювання; описано спосіб формування для напівпровідникового перетворювача вольт-амперної характеристики, потрібної для дугового зварювального процесу; надані рекомендації з розрахунків часу затримки установлення струму дуги, необхідного згідно з технологічним процесом.

Спосіб дугового зварювання металів з телевізійним стеженням за зростанням крапель, стікаючих з металічної проволоки або електроду [1] до стику зварювальних металів або зварювальної ванни, передбачає швидке керування зміною струму зварювання від одиниць до сотень амперів, що надходить від напівпровідникового перетворювача (джерела живлення) зварювального апарату. Під час формування електричної дуги струм перетворювача швидко зростає, частіше (типово), до 200 А. В цей час телевізійний датчик постійно стежить за зростанням краплі розплавленого металу електрода, вимірюється ширина та розраховується швидкість її зміни. Коли швидкість зміни ширини та розмір краплі досягає певного рівня, про що сигналізує телевізійний датчик й перед відривом краплі струм джерела за мілісекунди примусово зменшується, наприклад, до 50 А, завдяки чому відбувається процес плавного відриву краплі і зменшення її розбризкування. Під час контакту краплі з деталлю зменшується подача струму перетворювача, наприклад, до 10 А. Цей процес необхідний для злипання краплі розплавленого металу із зварювальною областю. Далі знову підвищується струм перетворювача до номінального значення.

Реалізація способу дозованої подачі електроенергії до зварювальної області під час дугового зварювання металів передбачає фільтрацію зображення розплавленого дугою електрода, обробку відеосигналу зображення телевізійного датчику шляхом вимірювання та реєстрації сигналу строки, що фіксує ширину відеоімпульсу, який плавно зростає і стає перед падінням краплі максимально широким. Далі відеосигнал строки перетворюється в сигнал постійної напруги. Коли амплітуда цього сигналу співпадає із наперед заданим сигналом настройки, що відповідає максимальній ширині краплі, система автоматичного керування формує імпульс, призначений для зменшення (або модуляції) подачі потужності електроенергії, тобто струму напівпровідникового перетворювача.

Функціональна схема системи керування дозованої подачі електроенергії під час дугового зварювання металів містить енергетичний напівпровідниковий перетворювач

(НП), систему керування параметрами перетворювача (СК), зварювальну дугову установку (ЗДУ), телевізійний датчик (ТД), формувач імпульсів (ФІ) керування перетворювачем, фільтр нижніх частот (ФНЧ) та схему порівняння (СП).

Параметри електроенергії живлення, потрібні для дугової установки, задаються енергетичним НП; ТД – спеціалізована телевізійна камера зі світловим фільтром, яка призначена для формування та реєстрації відеосигналів розміру крапель з частотою строк розгортки, ширина яких пропорційна розміру краплі розплавленого металу. ФНЧ виділяє постійну складову, пропорційну ширині попередньо сформованих імпульсів ФІ, і відсікає верхні гармоніки (кратних частоті строк сигналу телевізійного датчику). На вхід СП подається плавно зростаюча напруга з виходу ФНЧ (під час максимального збільшення розміру краплі металу перед падінням, напруга ФНЧ – максимальна) й певного, наперед заданого, значення опорної напруги. З виходу СП у момент зрівняння напруги ФНЧ та опорної напруги формується керуючий імпульс за допомогою СК енергетичним напівпровідниковим перетворювачем, завдяки чому зменшується або модулюється за певним законом подача потужності електроенергії (тобто струму) НП, тим самим підвищується ККД системи зварювання.

Періодичне зменшення подачі потужності електроенергії до дугової установки не тільки підвищує ККД системи зварювання, а також поліпшує якість заповненого розплавленим металом стику. Це пояснюється тим, що під час падіння крапель до стику металів (за рахунок зменшення струму, що подається до зварювальної дугової установки) не формуються (або зменшуються) бризки розплавленого металу, і шов на стику після охолодження не потребує подальшої обробки (шліфування).

Основні вимоги до системи є наявність енергетичного НП, здатного з високою швидкістю змінювати зварювальний струм. Залежно від процесів, що відбуваються в дузі, НП повинний у лічені мікросекунди змінити величину зварювального струму, необхідну для реалізації процесу переносу металу силами поверхневого натягу. Крім того, під час використання НП, призначеного для системи напівавтоматичного зварювання, при якій змінюється швидкості зварювання і вильоту електрода, НП працює в режимі зварювання серіями коротких замикань. Області його застосування НП у цілому аналогічні тим, що характерно для звичайних апаратів напівавтоматичного зварювання короткими замиканнями.

Для одержання можливості швидких змін подачі струму до зварювальної дуги доцільно використовувати НП, побудований за способом, описаним у роботі [2]. Мета способу – підвищення якості управління шляхом забезпечення заданої форми вихідної вольт-амперної характеристики (ВАХ). Суть способу полягає в порівнянні двох сигналів (сигналу, пропорційного середньому значенню вихідного струму, що одержується шляхом його безперервної інтеграції з скиданням на нуль у момент замикання регулюючого елемента і сигналу опорної напруги, форма якої визначається виглядом ВАХ і замиканні регулюючого елемента у момент їх рівності).

На рис. 1 представлена задана ВАХ залежності напруги ($U_{Вих}$) від струму ($I_{Вих}$) з позначенням струму короткого замикання ($I_{кз}$), на рис. 2 – блок-схема пристрою для реалізації способу; на рис. 3 – епюри напруг, що пояснюють принцип роботи пристрою, побудованого за представленою блок-схемою.

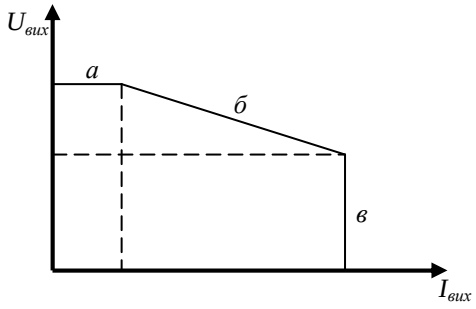


Рис. 1. Опорна напруга

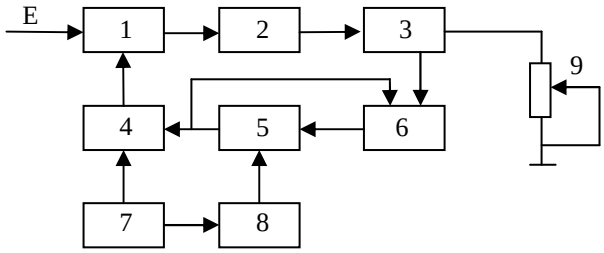


Рис. 2. Блок-схема системи формування ВАХ

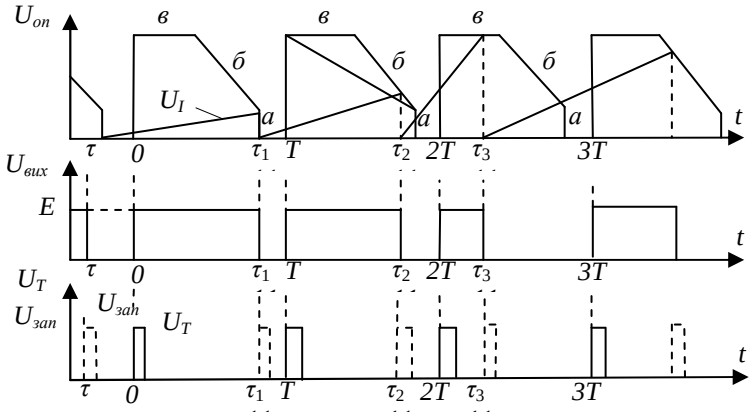


Рис. 3. Діаграми роботи системи формування ВАХ

Спосіб формування ВАХ щодо середніх значень струму і напруги полягає в тому, що інтеграція струму навантаження проводиться з моменту замикання регулюючого елемента силової частини в попередньому періоді до замикання його в поточному. Тоді, враховуючи, що в сталому режимі вказаний інтервал рівний періоду робочої частоти, напруга на виході інтегратора струму навантаження пропорційна середньому значенню струму навантаження.

Якщо напруга на виході інтегратора струму порівнюється із спеціально формованою опорною напругою, то залежно від величини середнього струму навантаження момент часу, що визначає їх рівність, є зміщеним відносно початку періоду робочої частоти. Шляхом замикання регулюючого елемента в ці моменти часу досягається зміна коефіцієнта заповнення імпульсів вихідної напруги $U_{вих}$ залежно від середнього струму навантаження. Таким чином, опорна напруга на періоді робочої частоти зв'язує величину середнього струму навантаження з напругою на ній.

Перетворювач, представлений на рис. 2, містить регулюючий елемент силової частини (*1*), вихідний фільтр (*2*), датчик струму (*3*), тригер (*4*), схему (*5*), інтегратор (*6*), генератор тактових імпульсів (*7*), генератор опорної напруги (*8*) і навантаження (*9*).

Для формування вихідної ВАХ з ділянкою стабілізації напруги *а*, лінійно падаючою ділянкою *б* і ділянкою стабілізації струму *в* (рис. 1), опорна напруга формується генератором опорної напруги у вигляді, показаному рис. 3. У моменті τ (рис. 3) генератор *7* тактових імпульсів виробляє імпульс U_T, який запускає генератор *8* опорної напруги. Одночасно по імпульсу U_T відбувається перекидання тригера *4* в стан, що відмикає регулюючий елемент *1* силової частини. З моменту τ_1 інтегратор *6* проводить інтеграцію напруги, що надходить з датчика *3* струму (шунта). З виходу інтегратора *6* напруга, пропорційна середньому струму навантаження, поступає на один вхід схеми порівняння *5*, на другий вхід якої поступає напруга $U_{оп}$ з генератора опорної напруги *8*. У момент τ_2 напруга U_i інтегратора *6* досягає опорного $U_{оп}$ і на виході схеми порівняння *5* з'являється імпульс $U_{зап.}$, який переводить тригер *4* в зворотне положення, що запирає регулюючий елемент *1* силової частини й

обнуляє інтегратор *6*. Після цього інтегратор починає новий період інтеграції напруги, пропорційної струму навантаження, і в наступний тактовий момент 2T відмикається регулюючий елемент силової частини *1* і наново формується опорна напруга $U_{оп}$. Якщо опір навантаження зменшується, то середній струм у навантаженні зростає і, відповідно, U_i наростає швидше. У результаті точка порівняння $U_{оп}$ переміщається вгору по ділянці *а* напруги $U_{оп}$ (рис. 3), що не приведе до зміни часу відкритого стану регулюючого елемента *1* силової частини (рис. 2). Тобто, із зростанням струму напруга навантаження залишається постійною, що відповідає ділянці, потрібної ВАХ (рис. 1).

Подальше збільшення струму навантаження приводить до переміщення точки порівняння $U_{оп}$ і U_i на участок з напругою $U_{оп}$ (рис. 3). При її русі вгору відбудеться зменшення часу відкритого стану регулюючого елемента. Це приводить до зміни середнього значення напруги на навантаженні із зростанням середнього струму, що відповідає ділянці *б*, потрібної ВАХ (рис. 1).

У разі продовження наростання струму навантаження напруга наростає ще швидше. Під час переходу точки порівняння U_i та $U_{оп}$ на ділянку *б*, пристрій переходить у режим стабілізації струму, що відповідає участку *б* на потрібній ВАХ (рис. 1). Таким чином, застосовуючи пропонований спосіб управління, можна використовуючи один конвертор, формувати задану вихідну ВАХ.

Спосіб формування потрібної ВАХ є універсальним і дозволяє розробити НП з будь-якою формою, в тому числі і ВАХ зі спадаючою формою, характерною для дугових зварювальних апаратів.

Для оцінки швидкості зміни та часу встановлення необхідного струму у перетворювачі використовується модель, що представлена на рис 4.

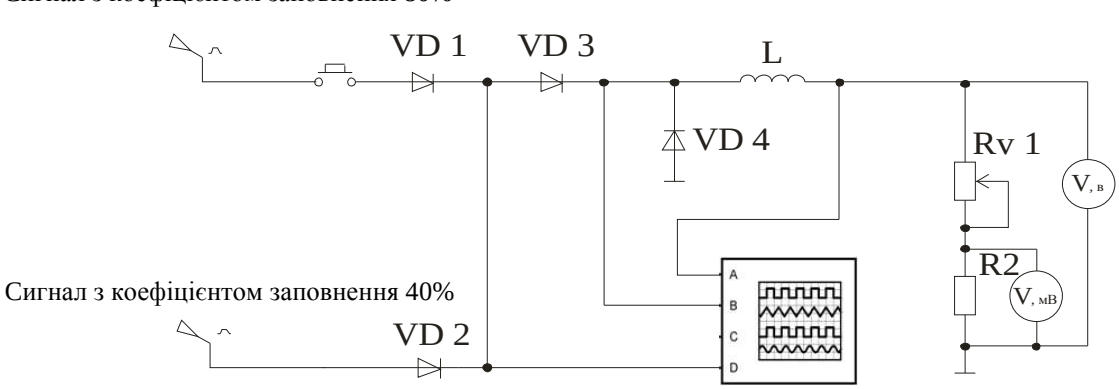


Рис. 4. Модель для розрахунків часу затримки зміну струмів дуги

За допомогою моделі визначалась швидкість зростання вихідного струму $I_{вих}$ перетворювача з мінімального значення (під час дії імпульсів з частотою 20 кГц, що управляють регулюючим елементом перетворювача) з коефіцієнтом заповнення 40 % до максимального – з коефіцієнтом заповнення 80 % з різними значеннями індуктивності *L*. Результати розрахунків показують, що найбільший час зменшення і збільшення струму перетворювача складають одиниці мс з використанням індуктивності L, що дорівнює одиниці мГн. Враховуючи, що за одну секунду під час дугового зварювання формуються приблизно 5-10 крапель металу, часу зміни струму дуги, що здійснюється за одиниці мс (перед падінням краплі), вистачає для зменшення розбризкування крапель металу електрода.

Для зменшення часу затримки встановлення струму дуги, слід зменшити індуктивність *L*, наприклад, до 100 мкГн. Результати визначення часу затримки зміну струмів дуги з використанням моделі з різними значеннями індуктивності *L* показані в табл. 1.

Таблиця 1

Результати розрахунків часу зміни струмів дуги

Індуктивність *L*, мкГн	Час встановлення струму НП від 100до 200 А, мкс	Час встановлення струму НП від 200 до 100 А, мкс
10	120	110
100	1100	1100
1000	12500	12500
2000	22000	22000

Висновки

Дозована подача електроенергії до зварювальної області дозволяє: підвищити ефективність технологічного процесу (за рахунок зменшення необхідної теплоти); поліпшити стабільність процесу зварювання за рахунок стабільності дуги при зміні вильоту електрода під час автоматичного та напівавтоматичного зварювання; поліпшує якість зварювального шва за рахунок зменшення розбризкування крапель металу.

Зменшення розбризкування крапель під час дугового зварювання приводить до скорочення часу зачищення перед остаточною обробкою виробу; збільшується час експлуатації сопла зварювального пальника до наступного зачищення, особливо при використанні 100 % вуглекислого газу в якості захисного газу.

Описаний спосіб керування дозованої подачі електроенергії під час дугового зварювання металів полегшує роботу зварювальника, звільняючи його від постійного контролю вильоту електрода в процесі зварювання й кута нахилу зварювального пальника, спрощується процес розробки автоматизованої системи зварювання. При цьому гарантується одержання якісного шва з низьким рівнем розбризкування.

Список використаних джерел

1. Система автоматичного керування дозованої подачі електроенергії під час дугового зварювання металів / С. В. Борцов, Д. В. Вайц, В. М. Співак // Матеріали І Міжнародної науково-практичної конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем».– Чернігів: Чернігівський державний технологічний університет, 2011.– С.125-126.

2. Способ управления конвертором: авторское свидетельство СССР № 843132, кл. Н 02 М 3/24, 1981 / А. В. Буденный, С. М. Фоменко, А. В. Ведымедь, А. О. Кондратюк и Ю. В. Морозов.

РОЗДІЛ IV. ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 004.9:378:005.6

В.В. Казимир, д-р техн. наук
М.В. Харченко, асистент
Чернігівський державний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

МОДЕЛЬНО-ОРІЄНТОВАНА ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА ПІДТРИМКИ УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ ВНЗ

У статті описується архітектура інформаційної системи підтримки управління якістю ВНЗ, в основу якої покладені вбудовані моделі робочих процедур. Формалізоване представлення робочих процедур виконується з використанням апарату керуючих Е-мереж. Розглядається приклад використання системи для процесу «Рецензування авторефератів, дисертацій та науково-методичної літератури».

Постановка проблеми

Ефективне управління ВНЗ (вищим навчальним закладом) в умовах сучасних ринкових відносин набуває особливо актуального значення у зв'язку з появою нових вимог, що формуються ринком праці, учасником якого виступає ВНЗ. Ці вимоги обумовлені вступом України до Світової організації торгівлі [1], приєднанням до Болонського процесу, спрямованістю державної політики на інтеграцію української системи вищої освіти у світову систему вищої освіти [2] тощо. Для адекватного механізму реагування на вимоги необхідна система управління якістю, орієнтована на задоволення потреб споживачів освітянських послуг. Основною метою розробки і впровадження системи є поліпшення, впорядкування, оптимізація роботи ВНЗ, забезпечення його дієздатності, високої конкурентоспроможності випускників, підвищення якості навчання, удосконалення навчального процесу і його відповідність міжнародним стандартам якості ISO серії 9000. Важливим чинником на цьому шляху повинно стати створення інформаційної системи підтримки процесів управління якістю у ВНЗ з можливістю використання якнайширшим колом користувачів.

Аналіз досліджень і публікацій

Дослідження питання управління якістю в освіті проводилось у роботах Качалова В.А. [3], Соколова В.М. [4], Поташника М.М. [5] та ін. Однак, незважаючи на свою актуальність, рівень дослідження питання інформаційного забезпечення процесів управління якістю ВНЗ залишається занадто низьким. До того ж відсутні необхідні програмні засоби, на основі яких могла би бути створена та впроваджена відповідна система підтримки управління якістю.

Мета статті

Метою статті є обґрунтування методів і технологічних засад проектування й розробки інформаційної системи підтримки управління якістю ВНЗ.

Система управління якістю ВНЗ та її структура

За національним стандартом України [6] під системою управління якістю слід розуміти систему управління, спрямовану на контролювання діяльності організації стосовно якості. У цій системі визначена взаємодія між такими елементами: відповідальність керівництва, що формує структуру системи, яка визначає і направляє ресурси; управління ресурсами; процеси створення продукту (надання послуги) з метою задоволення потреб і очікувань споживача; вимір, аналіз і вдосконалення, що забезпечуються через оцінку зворотного зв'язку з відповідальністю керівництва.

Основними вимогами, що висуваються до системи, є її придатність до сертифікації у міжнародних системах сертифікації, компактність, зрозумілість, зручність. Вона не повинна містити багато паперів.

Послідовність розробки і впровадження системи управління якістю описується стандартом [7], за яким спочатку визначається склад необхідних функцій системи, а потім визначаються структури, що виконують, або будуть виконувати ці функції. Наступним кроком є розробка нових та переробка або використання наявних нормативних документів для виконання всіх функцій.

У випадку ВНЗ під системою управління якістю можна розуміти сукупність структури, методик, процесів та ресурсів, необхідних для задоволення встановлених та очікуваних освітніх вимог конкретних споживачів шляхом планування, управління, забезпечення та покращення якості освітнього процесу [8]. Для ефективного впровадження такої системи необхідно привести практичну діяльність ВНЗ у відповідність з документацією, яка розробляється для того, щоб формально закріпити відповідальність за здійснення певних процесів університету.

Згідно з вимогами, викладеними у [9], система управління якістю ВНЗ являє собою систему взаємопов'язаних процесів. У загальному випадку під процесом розуміють сукупність взаємопов'язаних або взаємодійних робіт (операцій), що перетворюють входи на виходи. В нашому випадку під процесом будемо розуміти будь-яку діяльність або сукупність видів діяльності ВНЗ, результатами якої є освітянські послуги.

Для якісного функціонування ВНЗ повинен опрацювати механізм застосування і реалізації у своїй діяльності процесного підходу, тобто визначити численні взаємопов'язані та взаємодіючі процеси та управляти ними. Визначені процеси, які зазвичай є багатодисциплінарними, мають охоплювати адміністративні послуги та інші форми підтримки діяльності ВНЗ, а також процеси, що стосуються оцінювання. Їх класифікація може проводитись за наступними групами:

– управлінські процеси;

– процеси надання послуг;

– процеси забезпечення надання послуг;

– процеси управління ресурсами.

До кожної групи відноситься певний перелік процесів, який може бути різним для різних ВНЗ. Визначені процеси постійно взаємодіють між собою. Схема взаємодії процесів у системі управління якістю може мати наступний вигляд (рис. 1):

Рис. 1. Схема взаємодії процесів системи управління якістю ВНЗ

Кожен процес має вхід і вихід. Згідно з наведеною вище схемою, виходи одних процесів безпосередньо є входами інших. Окрім входів і виходів, для процесу обов'язково визначаються власник, керівник, учасники та ресурси.

Власник процесу – це посадова особа або структурний підрозділ, відповідальний за функціонування, моніторинг та аналізування процесу. Він повинен забезпечити однозначне розуміння всіма учасниками процесу їх відповідальності і повноважень.

Керівник процесу – це посадова особа або структурний підрозділ, відповідальні за виконання та контролювання процесу.

Учасник процесу – це посадові особи або структурні підрозділи, що беруть участь у реалізації процесу.

Ресурси – це ресурси, які надаються у розпорядження власнику процесу для його виконання. Наприклад, компетентний персонал, матеріально-технічне забезпечення, інформаційно-комунікаційне забезпечення тощо.

Графічно інформацію про процес можна представити у вигляді схеми (рис. 2).

Рис. 2. Схема процесу «Рецензування авторефератів, дисертацій та науково-методичної літератури»

Більш докладно кожен процес описується у відповідній методиці системи управління якістю, яка являє собою текстовий документ, де окрім схеми надається інформація про призначення процесу, управління процесом, виконання процесу та його оцінка. Розділ «Управління процесом» описує етапи виконання процесу. Для кожного етапу визначається його зміст, терміни виконання, учасники і документальний супровід (необхідні документи). У розділі «Виконання процесу» у текстовому вигляді міститься повний опис послідовності дій, що здійснюються під час процесу.

Крім наведених розділів, методика містить додатки з формами документів, що необхідні для виконання процесу і є його об’єктом управління. Саме тому із впровадженням у ВНЗ системи управління якістю значно збільшується (в рази) паперовий документообіг. У свою чергу, це призводить до росту як мінімум на порядок тривалості обробки документації, що знижує достовірність інформації, яку отримує керівництво після її обробки, і уповільнює процес реагування університету на зміни у зовнішньому середовищі. Як наслідок, виникає необхідність у створенні такої інформаційної системи підтримки управління якістю, яка буде забезпечувати ефективний документообіг у ВНЗ.

Формалізоване моделювання процесів управління якістю

Всередині системи управління якістю ВНЗ кожен документ, або їх сукупність, переміщується за строго встановленим способом (алгоритмом). Такий алгоритм будемо називати робочою процедурою.

Під час виконання процесу може використовуватись декілька документів, способи переміщення яких описуються своїми робочими процедурами. Сукупність робочих процедур формує алгоритм виконання всього процесу. Тому, щоб змоделювати конкретний процес, необхідно побудувати модель (або моделі) робочої процедури, що його описує.

Процес моделювання робочих процедур можна поділити на два етапи:

– розробка концептуальної моделі;

– розробка формалізованої моделі.

Концептуальна (змістовна) модель – це абстрактна модель, що визначає (описує) робочу процедуру. Вона є основою для розробки формалізованої моделі. В якості прикладу розглянемо процес побудови концептуальної моделі робочої процедури «Рецензування наукових продуктів». Рецензія або відгук – це документ, який входить у перелік документів системи управління якістю ВНЗ. З відповідної методики, що містить форму документа, визначаються: особа, яка формує документ і генерує його відправку, тобто є його власником; виконавці процесу, що опрацьовують документ; дії, які виконують виконавці за документом, та строки виконання цих дій. Окрім наведеної інформації, методика містить вербальний (словесний) опис проходження документа по виконавцям. Для більшої наочності концептуальна модель робочої процедури може бути представлена у вигляді схеми алгоритму (рис. 3).

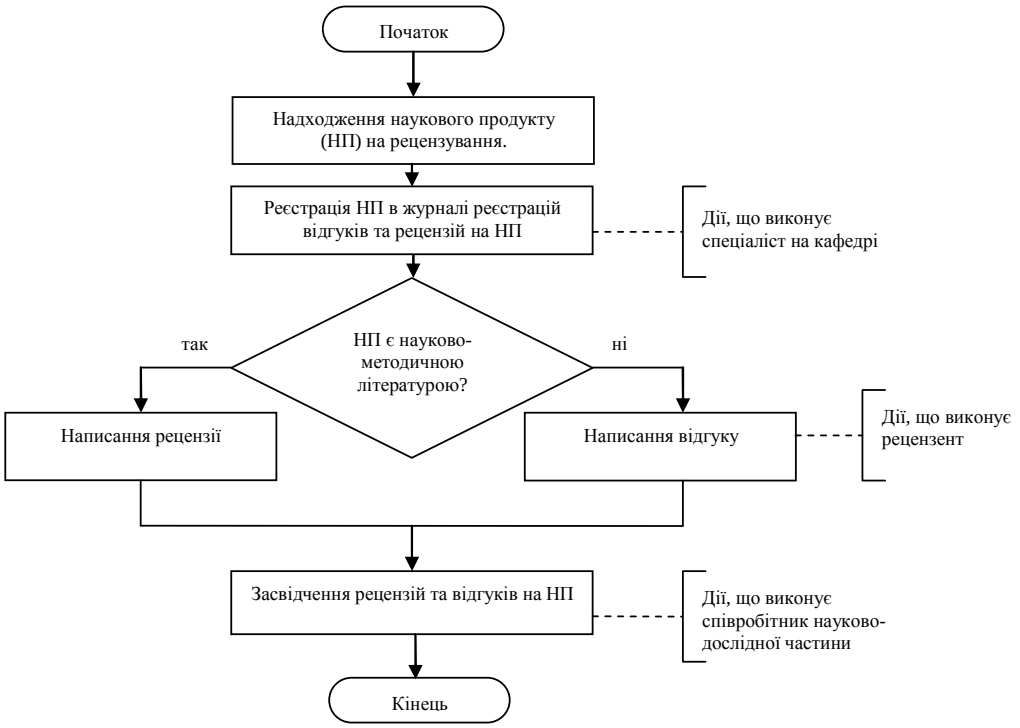


Рис. 3. Схема алгоритму робочої процедури «Рецензування наукових продуктів»

Ця робоча процедура повністю моделює процес «Рецензування авторефератів, дисертацій та науково-методичної літератури» системи управління якістю.

На наступному етапі приступають до створення формалізованої моделі робочої процедури, яка будується з використанням апарату керуючих Е-мереж [10]. Це пов’язано з тим, що весь процес виконання робочої процедури можна представити у вигляді орієнтованого графу дискретних станів, а її динаміку – у формі процесів переміщення документів у мережі.

Керуюча Е-мережа складається з певним чином (відповідно до логічної послідовності, яка задається концептуальною моделлю) зв’язаних між собою Е-мережевих переходів. Кожен перехід реалізує перебування мітки, яка циркулює в мережі, в тій чи іншій позиції. За переходами закріплені дії, що визначаються концептуальною моделлю ро-

бочої процедури. Мітці в мережі відповідає документ, а позиції – особа, яка опрацьовує документ. На цьому етапі специфікуються параметри моделі, атрибути міток (документів) та визначаються їх початкові значення. Формалізована модель робочої процедури «Рецензування наукових продуктів» може мати наступний вигляд (рис. 4):

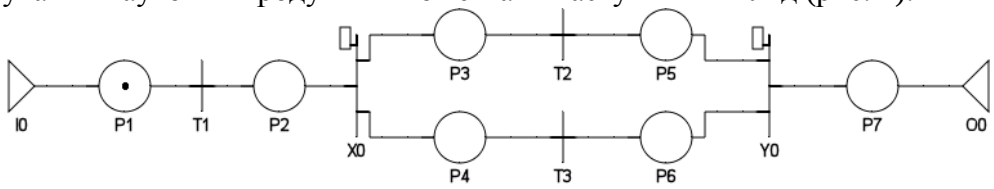


Рис.4. Формалізована модель робочої процедури «Рецензування наукових продуктів»

Дамо короткий опис моделі. Переходи моделюють наступні дії: Т1 – реєстрація наукового продукту та відправка рецензенту; Х0 – перевірка типу наукового продукту; Т2 – написання рецензії; Т3 – написання відгуку; У0 – засвідчення рецензії/відгуку.

Вирішальна функція переходу Х0 визначає подальший напрямок розвитку процедури.

Стани робочої процедури, що відповідають маркованим позиціям, мають наступне визначення: Р1 – запит на реєстрацію наукового продукту; Р2 – запит на рецензування; Р3 – запит на оформлення рецензії; Р4 – запит на оформлення відгуку; Р5 – запит на засвідчення рецензії; Р6 – запит на засвідчення відгуку; Р7 – запит на відправку рецензії/відгуку.

Вбудовування формалізованих моделей процесів в інформаційну систему підтримки управління якістю ВНЗ

Для інформаційної підтримки системи управління якістю ВНЗ була розроблена система, яка являє собою комплекс програмних засобів, що забезпечують побудову формалізованих моделей робочих процедур у вигляді набору графічних конструкцій, перетворення графічних представлень цих моделей в xml-документи та реалізацію управління процесами системи управління якістю на основі побудованих моделей. Архітектура системи представлена на рис. 5. Вона складається з трьох рівнів: рівень представлення даних (Front-End Tier), рівень логіки застосування (Middleware Tier) та рівень зберігання даних (Persistent Storage).

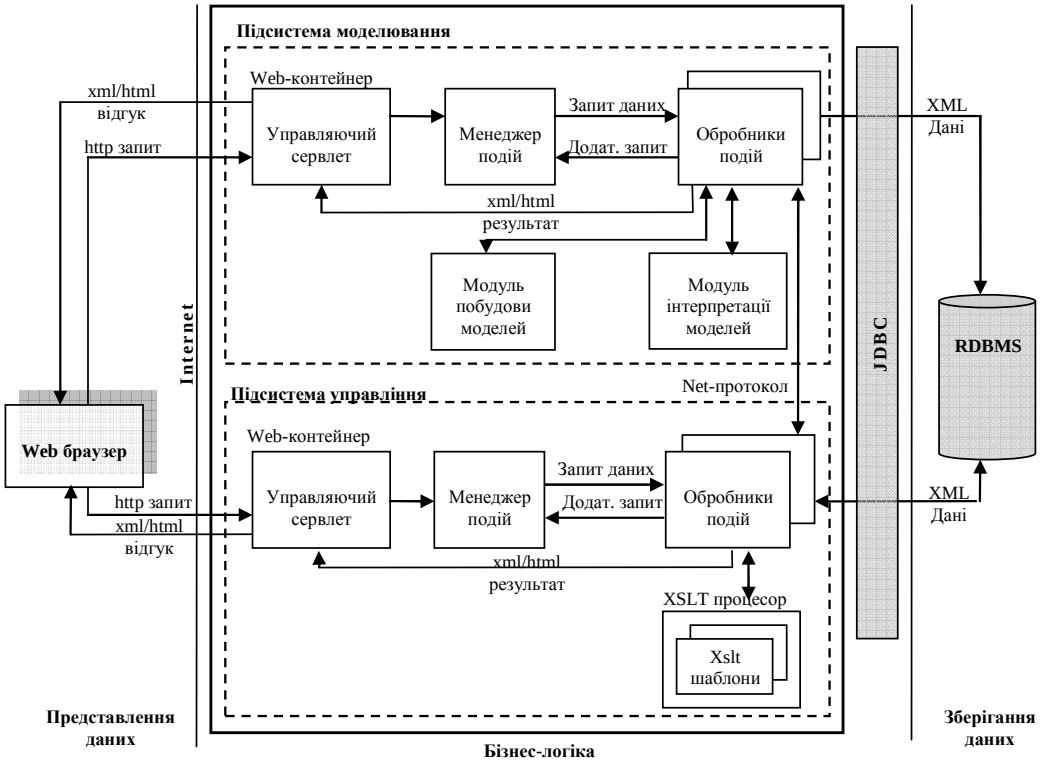


Рис. 5. Архітектура інформаційної системи підтримки управління якістю

Рівень представлення відповідає за візуальне представлення даних (інтерфейс користувача). Задачею цього рівня є надання користувачеві доступу до функцій системи і даним через компоненти візуального інтерфейсу.

Рівень бізнес-логіки реалізує всі функціональні можливості системи. Він складається з двох підсистем: підсистеми моделювання і підсистеми управління. В кожній із них знаходяться:

– управляючий сервлет, який приймає запит від клієнтського застосування, перетворює запит в об'єктний вигляд і передає його менеджеру подій;

– менеджер подій, який отримує запити на обробку події і, якщо обробник подій вільний, передає йому управління;

– обробники подій – бізнес-об'єкти для обробки подій.

Підсистема моделювання містить два додаткові модулі: модуль побудови моделей і модуль інтерпретації моделей. Модуль побудови моделей призначений для забезпечення можливості користувача будувати і зберігати формалізовані моделі робочих процедур засобами web-інтерфейсу. Формалізовані моделі є еталонними. В модулі інтерпретації моделей відбувається зіставлення параметрів робочої процедури з її еталонною моделлю і, якщо необхідно, ініціюється відображення моделі.

У підсистемі управління є XSLT-процесор, що формує елементи інтерфейсу користувача шляхом перетворення XML-документів в їх HTML представлення.

Рівень зберігання даних відповідає за збереження моделей та їх атрибутів. На ньому розташована реляційна база даних, яка складається з наступних таблиць:

– documents – зберігає елементи моделі у форматі xml (переходи, позиції, мітки);

– attributes – зберігає атрибути елементів моделі: тип елементу, час створення та час модифікації, ідентифікатор власника робочої процедури, ідентифікатор процесу системи управління якістю, якому належить робоча процедура та ідентифікатор власника самого процесу;

– links – таблиця зв'язків між елементами моделі. Записи таблиці дозволяють сформувати модель конкретної робочої процедури з елементів, що зберігаються в таблиці documents;

– reminder – задані шаблони повідомлень, які необхідно відправляти виконавцям робочих процедур;

– right – права доступу користувачів системи.

Всі елементи керуючої Е-мережі описуються відповідними шаблонами у форматі xml, які зберігаються в базі даних. У процесі побудови формалізованої моделі робочої процедури шаблони зв'язуються між собою певним чином і формують xml-файл моделі, що також зберігається в базі даних.

Моделювання робочої процедури відбувається в підсистемі моделювання інформаційної системи підтримки управління якістю. Дана підсистема може працювати в двох режимах:

– режим побудови моделі;

– режим перегляду стану моделі.

У режимі побудови моделей користувач за допомогою набору графічних конструкцій будує формалізовану модель робочої процедури (рис. 6) і зберігає її в базі даних.

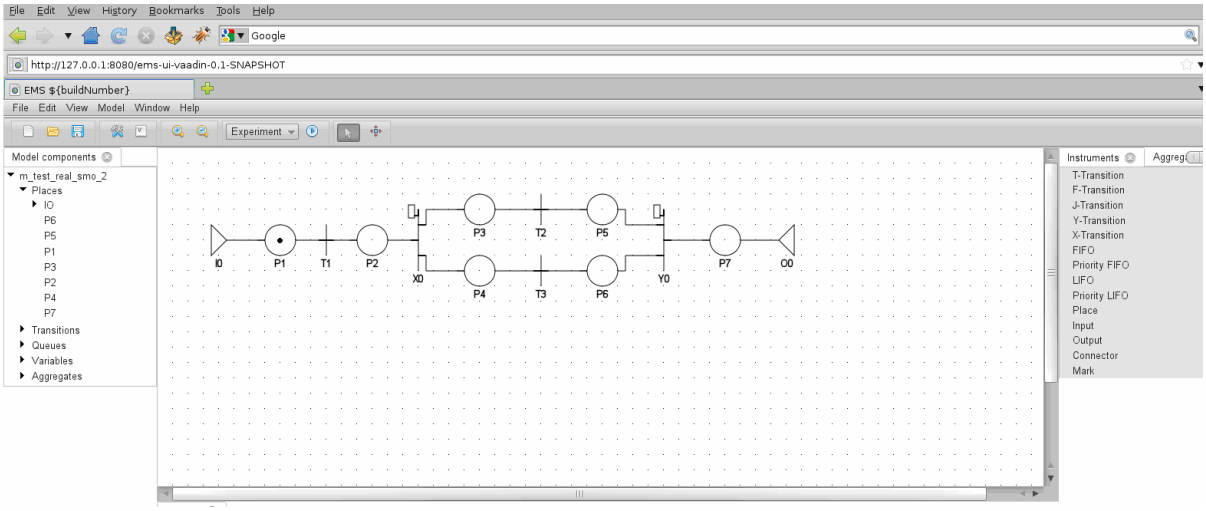


Рис. 6. Графічний редактор формалізованих моделей робочих процедур

Будувати моделі можуть власники процесів системи управління якістю або користувачі системи, які мають відповідні права доступу на виконання даної функції.

У режимі перегляду стану моделі можна подивитись, на якому етапі й у якого виконавця знаходиться документ у конкретний момент часу. Тобто цей режим дозоляє відстежувати процес виконання конкретної робочої процедури в динаміці. При цьому відбувається зіставлення атрибутів моделі, що змінюються в процесі виконання робочої процедури, з її еталоном, і вивід моделі на екран.

Підсистема управління ініціює роботу підсистеми моделювання, забезпечує створення екземплярів робочих процедур. Її засобами призначаються власники та виконавці процедур, задаються значення необхідних параметрів тощо.

Зв'язок між підсистемами реалізований через протокол обміну даними. Це надає можливість розміщувати дві підсистеми на різних комп'ютерах, що забезпечує підвищення швидкодії інформаційної системи загалом.

Таким чином, наведена архітектура інформаційної системи підтримки управління якістю ВНЗ дозволяє вбудовувати моделі робочих процедур і на їх основі управляти процесами системи управління якістю університету.

Висновки

1. Розглянуто особливості формування системи управління якістю освітянських послуг у ВНЗ, що дозволило визначити основні групи процесів, які відбуваються в університеті, та побудувати можливу схему їх взаємодії, а також встановити, що об'єктом управління для визначених процесів є документи.
2. Обґрунтовано метод моделювання процесів системи управління якістю освітянських послуг, що базується на використанні апарату керуючих Е-мереж. Прийнято кожен процес представляти у вигляді однієї або декількох робочих процедур.
3. Запропоновано архітектуру інформаційної системи підтримки управління якістю освітянських послуг, яка дозволяє вбудовувати формалізовані моделі робочих процедур і на їх основі управляти процесами системи управління якістю ВНЗ.

Список використаних джерел

1. Генеральна угода про торгівлю послугами [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://zakon.rada.gov.ua/cgi-bin/laws/main.cgi?nreg=981_017
2. Про вищу освіту: Закон України [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://zakon1.rada.gov.ua/cgi-bin/laws/main.cgi?nreg=2984-14&p=1317043990017317
3. Качалов В. А. Стандарты ИСО 9000 и проблемы управления качеством в вузах (записки менеджера качества) / В. А. Качалов. – М.: ИздАТ, 2001. – 112 с.

4. Соколов В. М. Стандарты в управлении качеством образования / В. М. Соколов. – Н. Новгород: ННГУ, 1993. – 75 с.

5. Поташник М. М. Управление качеством образования / М. М. Поташник. – М.: Педагогическое общество России, 2006. – 448 с.

6. Система управління якістю. Основні положення та словник термінів (ISO 9000:2005, IDT) : ДСТУ ISO 9000:2007. – [Чинний від 2007-09-03]. – К.: Держспоживстандарт України, 2008. – 35 с. – (Національний стандарт України).

7. Система управління якістю. Вимоги (ISO 9001:2008, IDT) : ДСТУ ISO 9000:2009. – [Чинний від 2009-06-22]. – К.: Держспоживстандарт України, 2009. – 34 с. – (Національний стандарт України).

8. Варжина Н. В. Формирование системы управления качеством образовательных услуг: автореф. дис. на соискание уч. степени канд. экон. наук. спец. 08.00.05 – «Экономика и управление народным хозяйством (экономика, организация и управление предприятиями, отраслями, комплексами сферы услуг)» / Н. В. Варжина. – Екатеринбург, 2004. – 19 с.

9. Система управління якістю. Настанови щодо застосування ISO 9001:2000 у сфері освіти (IWA 2:2003, IDT) : ДСТУ-П IWA 2:2007. – [Чинний від 2007-09-03]. – К.: Держспоживстандарт України, 2008. – 70 с. – (Національний стандарт України).

10. Казимир В. В. Модельно-ориентированное управление интеллектуальными производствами и системами: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук: 05.13.06 / Казимир Владимир Викторович. – К., 2005. – 328 с.

УДК 681.324

В.А. Бичко, канд. фіз.-мат. наук
Д.О. Абламський, магістрант
Чернігівський державний технологічний університет, м.Чернігів, Україна

Dr. Ramit Azad, assistant professor
American International University-Bangladesh, Dhaka, Bangladesh

ПЕРЕТВОРЕННЯ ЗАДАЧІ РОЗПІЗНАВАННЯ АКУСТИЧНИХ СИГНАЛІВ У ЗАДАЧУ РОЗПІЗНАВАННЯ ЗОРОВИХ ОБРАЗІВ

Розроблена комп'ютерна система аналізу акустичних сигналів, що дозволяє будувати зоровий образ акустичного потоку інформації. Проведений аналіз параметрів, які впливають на якість первинної обробки акустичного потоку. Реалізована можливість перетворення задачі розпізнавання акустичної інформації на задачу розпізнавання зорових та просторових образів.

Вступ

Останнім часом особливу актуальність набуває розвиток систем розпізнавання акустичних інформаційних потоків та їх синтезу. За допомогою таких систем вирішується широкий спектр завдань, зокрема, голосове управління різноманітними процесами, та наповнення баз даних і баз знань у системах штучного інтелекту.

При створенні таких систем актуальним залишається питання автоматизації процесу інтерпретації мови та пошуку таких форм її відображення, які забезпечували б просте і надійне виділення інформативних ознак сигналу. На ефективність акустичного аналізу впливає як вибір форми відображення акустичного сигналу, з яким працює система автоматичного розпізнавання мови, характер ознак, що використовуються для подальшої фонетичної обробки, а також ступінь надійності методу, який використовується для інтерпретації акустичного потоку інформації.

Існує безліч підходів і методів вирішення задачі розпізнавання мовлення [1; 2; 3]. Процес розпізнавання можна умовно розділити на три етапи: отримання та первинна обробка акустичного сигналу, розпізнавання фонем, слів і розуміння мови. Досить ву-

зьким містком цього ланцюга можна вважати другий етап, оскільки він пов'язаний з наявністю широкого різноманіття особистісних фізичних характеристик мови людини. З іншого боку, існує багато методів розпізнавання зорових образів з розвинутою методологією класифікації [4; 5]. На нашу думку, використання такої методології може виявитися досить ефективним при вирішенні задач розпізнавання мовлення.

Таким чином, задача цієї роботи полягає у розробці комп'ютерної системи аналізу звуку (КСАЗ), здатної виконувати первинну обробку акустичного сигналу та перетворювати його на зоровий образ.

Найпоширеніший підхід обробки акустичного сигналу базується на його спектральному представленні [6]. При використанні спектрального представлення застосовується дискретне перетворення Фур'є. При цьому акустичний сигнал ділять на вікна, кожне з яких відповідає певній ознаці фонеми. Але такий підхід дозволяє отримати і проаналізувати ознаки лише на окремій ділянці звукового сигналу. Проте, якщо весь фрагмент інтерпретованої фонеми представити графічно – у вигляді часового розгорнення (спектрограми), то це дозволить перейти від завдання розпізнавання акустичних сигналів (ЗРАС) до задачі розпізнавання зорових образів (ЗРЗО). При цьому з'явиться можливість застосовувати для інтерпретації існуючі алгоритми розпізнавання графічних образів [7; 8]. З нашої точки зору, такий підхід виглядає досить перспективним.

Методика отримання тривимірної моделі

В основу реалізації методу перетворення задачі розпізнавання звукової інформації на задачу розпізнавання зорових образів покладена можливість отримання послідовності елементів масиву, кожен з яких являє собою набір значень частотного спектру фонеми (рисунок 1). Упорядкований набір таких елементів утворює поверхню, яка є унікальним ідентифікатором фонеми. Фізично така поверхня залежить від амплітуди звукового сигналу двох параметрів: частоти та часу.

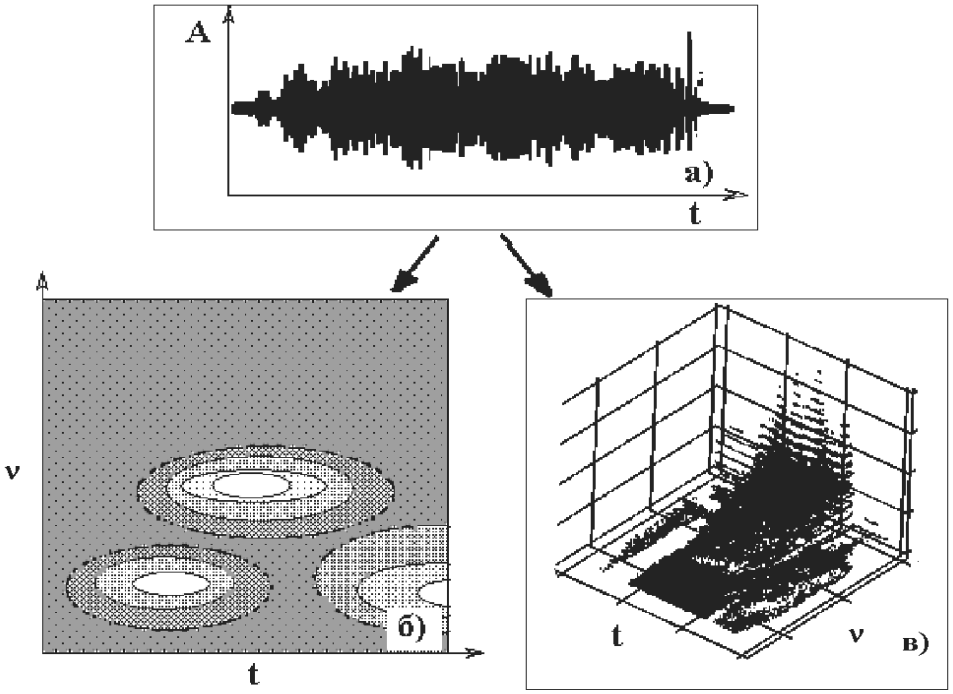


Рис. 1. Схема перетворення даних системою а – вхідний відбиток акустичного потоку; б – двовимірний образ фонеми; в – тривимірний образ фонеми

Залежно від подальшої необхідності, отриману поверхню можна використовувати або як двовимірний (рис. 1, *б*), або як тривимірний (рис. 1, *в*) унікальний образ послідовності фонем акустичного потоку інформації (рис. 1). У разі застосування її як зорового образу,

поверхню можна представити як плоский малюнок, на якому інтенсивність кольору на певній ділянці буде пропорційна відповідному значенню амплітуди акустичного сигналу (рис. 1, *б*).

На рисунку 2 зображений процес послідовності обробки акустичного потоку інформації аналітичною системою.

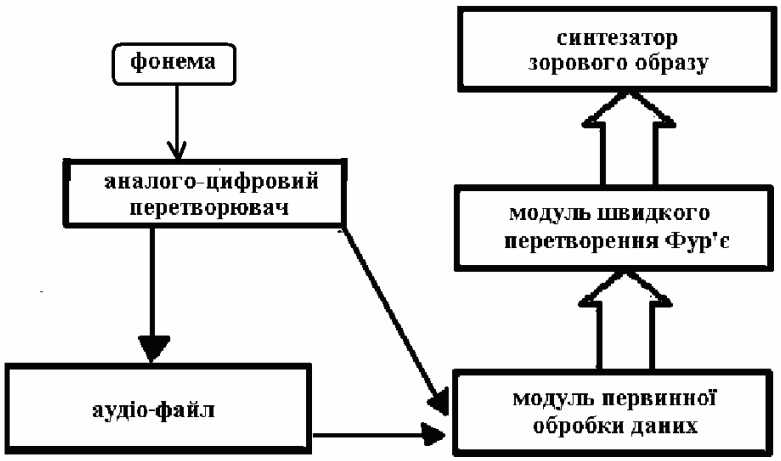


Рис. 2. Схема отримання та перетворення даних системою

Виходячи з вищесказаного, аналітична система повинна забезпечити можливість виконання наступних дій:

1) отримання звукової інформації;
2) попередню обробку звуку;
3) перетворення первинних даних у двовимірний масив даних спектрограми;
4) відтворення графічного зображення спектрограм;
5) зберігання кінцевих результатів у файл.

У розробленій КСАЗ за допомогою мікрофону виконується перетворення звукових коливань в електричні коливання, які надалі можуть бути посилені, відфільтровані від перешкод, а потім переведені у цифровий формат для подальшої обробки.

Для зберігання первинних даних необхідно було вибрати придатний формат звукового файлу. Відповідні формати файлів, що існують на цей час, можна поділити на дві групи, які відрізняються методом стиснення даних, а саме: з втратами та без втрат даних.

MP3 є одним з найпоширеніших форматів. У форматі MP3 використовується алгоритм стиснення з втратами, розроблений для істотного зменшення розміру даних. Принцип стиснення полягає в зниженні точності частин звукового потоку, що практично не впливає на якість сприйняття більшості людей [9]. Цей метод називають кодуванням сприйняття.

WAV – формат файлу-контейнера для зберігання цифрового аудіопотоку. Цей формат найчастіше використовується як оболонка для нестисненого звуку (PCM), коли для кожного значення амплітуди сигналу виділяється певне число біт [9]. Проте в контейнер WAV можна помістити звук, стиснений майже будь-яким кодеком.

У КСАЗ використовується WAV-формат, оскільки він більш простий у використанні і дозволяє зберігати дані без втрат.

При виборі несучої частоти аналого-цифрового перетворення, згідно з теоремою Котельникова [6], необхідно врахувати, що така частота повинна бути вдвічі вище за максимальну частоту спектра перетворюваного сигналу. У різних людей межі діапазону чутних частот можуть відрізнятися. Проте вважається, що частота звукових коливань, які здатна відчувати людина, не перевищує 20000 Гц [9]. Отже, для аналого-цифрового перетворення без втрати якості звукового сигналу потрібно вибрати частоту перетворення, не меншу ніж 40000 Гц.

Наступним етапом після обробки сигналу є попередній аналіз даних. Результатом аналізу сигналу є послідовність мовних кадрів. Звичайно, кожен мовний кадр – це результат аналізу сигналу на невеликому відрізку часу (порядку 10 мс). Вибір оптимального значення розміру вікна було здійснено емпіричним шляхом.

При такій обробці щодо послідовності потоку даних переміщується вікно відбору, розмір якого дорівнює N елементів цифрової послідовності даних (рисунок 3). Значення N відповідає розміру вікна дискретного перетворення Фур'є (ДПФ). Під час аналізу вікно переміщується на ΔN позицій відносно попереднього положення. У кожному новому положенні воно заповнюється новим набором даних звукового сигналу.

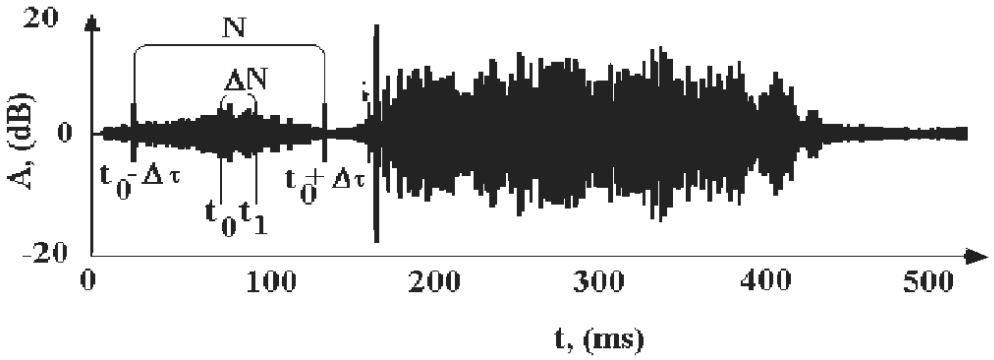


Рис. 3. Отримання сегмента даних

На практиці ДПФ обчислюється за формулою 1:

$$X_k = \frac{1}{N}\sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-\frac{2\pi i}{N}kn}, \qquad (1)$$

де X_k – амплітуди частот коливань.

При підрахунках інформація про фазу акустичного сигналу відкидається, оскільки при вирішенні цієї проблеми вона є надлишковою. З метою пришвидшення обчислень у КСАЗ було використане перетворення за алгоритмом швидкого перетворення Фур'є.

У результаті масштабування первинних даних та ДПФ відтворюється крива спектра, яка відображає залежність амплітуди звукової хвилі від частоти у момент часу t_0 (рис. 4).

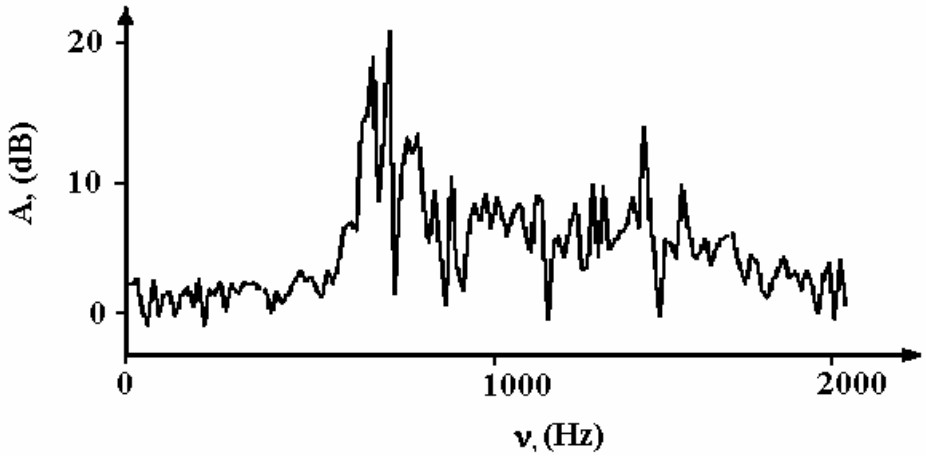


Рис. 4. Результат ДПФ звукового сигналу для певного моменту часу

Після виконання перетворень над послідовністю сегментів звукового сигналу з набору спектральних кривих утворюється часова розгортка – спектрограма, що являє собою у загальному вигляді нерегулярну поверхню (рис. 5).

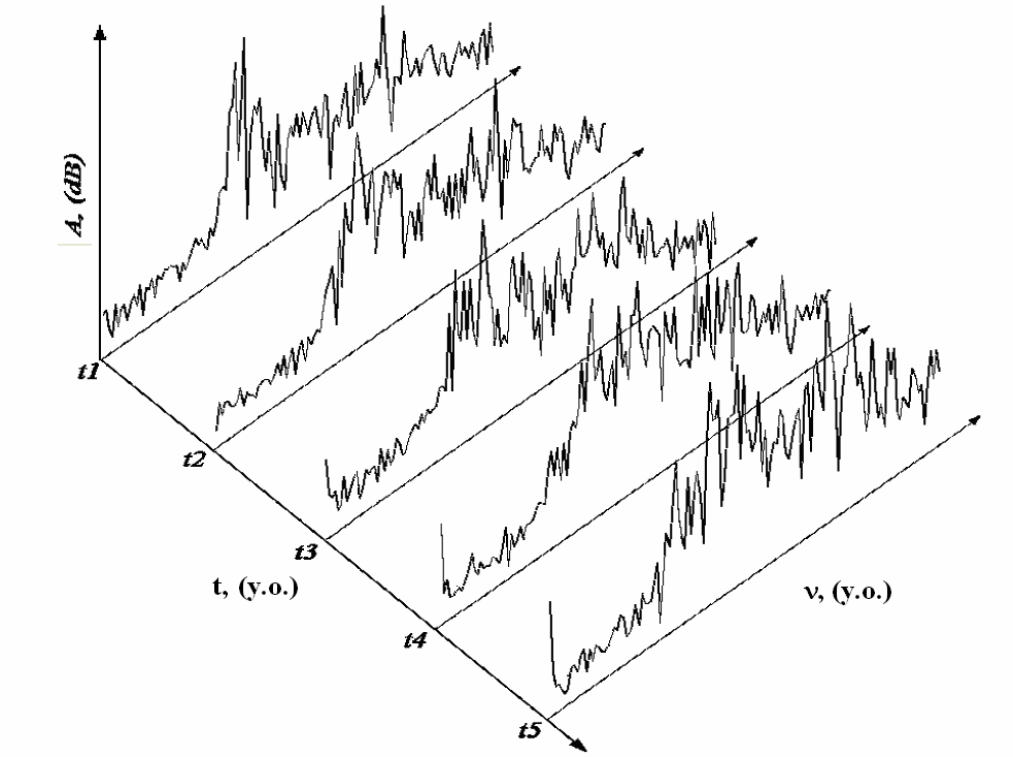


Рис. 5. Об'єднання сегментів даних БПФ у спектральну поверхню зорового образу

Результати та обговорення

У ході роботи були отримані різні варіанти спектрограми фонемних послідовностей з метою визначення оптимальних параметрів, необхідних для представлення та зберігання таких спектрограм. Приклади отриманих двовимірних та трьохвимірних зображень спектрограм представлені на рисунках 6 та 7 відповідно. При двомірному відтворенні, з міркувань доцільності, була реалізовано залежність, в якій значення амплітуди сигналу пропорційне інтенсивності світлого кольору на відповідній ділянці поверхні спектрограми (рис. 6). Вочевидь, що темним кольором позначені місця з низьким рівнем амплітуди.

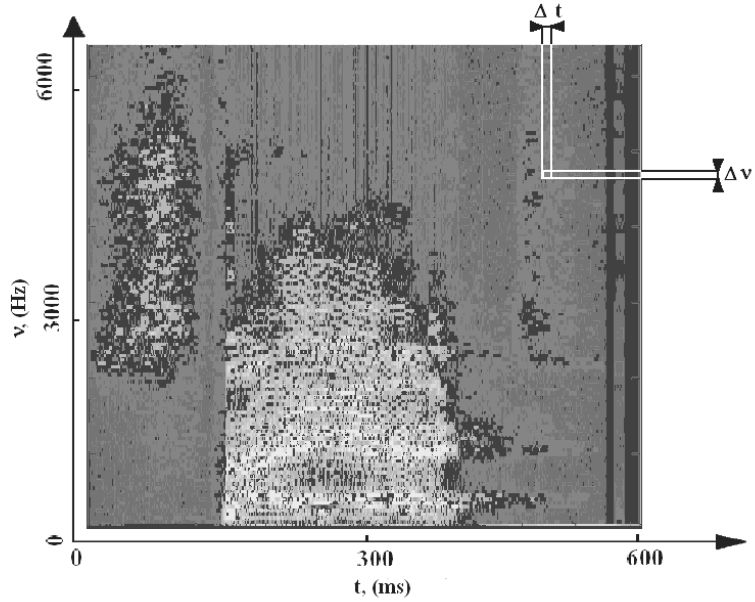


Рис. 6. Двовимірне відображення спектрограми звукового сигналу, що відповідає фонемі слова „стій"

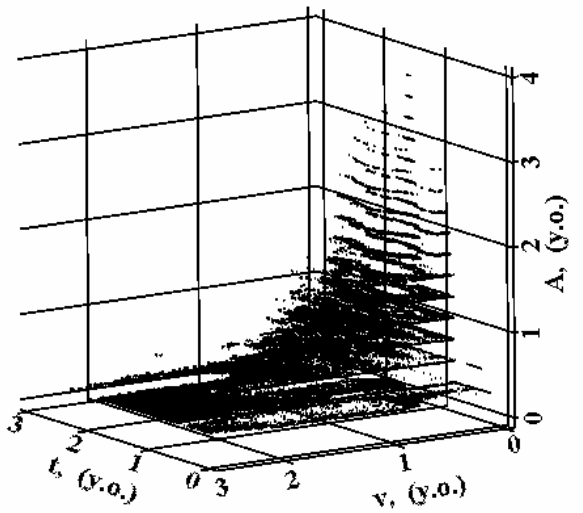


Рис. 7. Тривимірне відображення спектрограми звукового сигналу, що відповідає фонемі слова „стій”

Для визначення оптимального формату представлення спектрограм було проаналізовано наступні параметри: крок дискретизації частоти Δν спектрограми, розмір кроку зміщення Δt вхідного вікна для ДПФ (рис. 6). Слід нагадати, що значення цих двох параметрів визначають розмір елементарної ділянки спектрограми, та, відповідно, обумовлюють роздільну здатність спектрограми.

Вочевидь, більша роздільна здатність точніше відображає інформаційне поле. Проте надмірно часті вимірювання можуть привести до невиправданого зростання кількості даних і даремної витрати апаратних ресурсів при їх обробці.

Розрахунок оптимального кроку дискретизації частоти Δν обумовлений наступними міркуваннями. Дані про частотні характеристики акустичного сигналу, який здатна відчувати людина, утворені різними джерелами, відрізняються між собою. Так, самим широким можна вважати діапазон 16-20000 Гц. Але акустична частота людської мови лежить у діапазоні частот 150-4000 Гц [2].

Крім того, дослідження мовних фонем людини показали, що для них інформативність різних частин спектра неоднакова. А саме у низькочастотній області спектра міститься більше інформації, ніж у високочастотній області. Тому для економнішого використовування обчислювальних ресурсів і збільшення продуктивності роботи системи можливо частково зменшити кількість даних з високочастотної області спектра. Для цього у даній системі застосований найпоширеніший і найпростіший метод — логарифмічне стиснення, або mel-стиснення.

Логарифмічне стиснення спектра виконується за формулою:

$$m = a \times \log(f \times b + 1), \tag{2}$$

де f – частота в спектрі; m – частота в новому стислому частотному просторі a,b – параметри стиснення a і b.

Враховуючи вищесказане, для оцінки значень частотного кроку дискретизації Δν було розраховано параметри стиснення a і b для двох крайніх діапазонів 10-44000 Гц [9] та 150-4000 Гц [2]. Параметри a,b визначаються з системи рівнянь. Приклад такого розрахунку для ширшого діапазону наведено нижче (формули 3,4):

$$\begin{cases} a \times \log(10\,b + 1) = 1 \\ a \times \log(44000\;b + 1) = 255 \end{cases} \tag{3}$$

Розв’язок цієї системи рівнянь дає значення відповідно: a = 135,385, b = 0,001715:

$$m = 135 \times \log(0{,}001715 \times f + 1) \tag{4}$$

Як видно з рисунку 8, використання вужчого частотного діапазону дає можливість суттєво зменшити розширення інтервалу чутливості при використанні логарифмічного стиснення. У цьому разі роздільна здатність на всьому діапазоні не буде перевищувати 20 Гц, що є співрозмірним з роздільною здатністю при ідентифікації акустичного сигналу людиною.

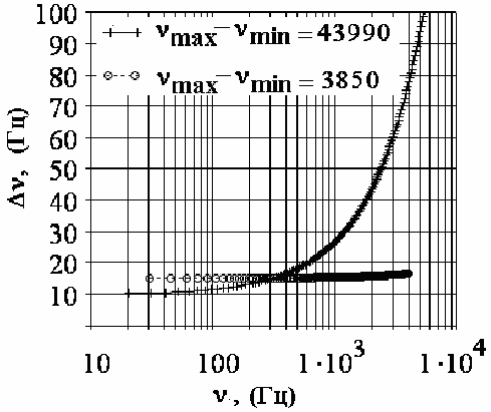


Рис. 8. Залежності роздільної здатності частоти спектрограми від інтервалу частотного діапазону спектрограми при фіксованому значенні N=256частотних ділянок спектрограми

Визначення оптимального часового кроку Δt спектрограми на міркуваннях, що максимально можлива роздільна частота сприйняття головного мозку людини зорових зображень не перевищує 30 Гц [2]. Тобто, щоб людина здатна була б ідентифікувати та запам'ятати акустичний сигнал як окремий, він повинен тривати не менш 25 мс з запасом для уникнення помилок [2].

На рисунку 9 наведена залежність розміру файлу даних спектрограми фіксованої тривалості (0,7 с) від М – кількості ділянок за частотою та тривалістю часового кроку Δt. З рисунку видно, що розмір файлу має мультиплікативну залежність від роздільності спектрограми за часом та частотою. Вочевидь, така залежність суттєво впливає на кінцевий розмір файлу даних спектрограми. Такі параметри відіграють суттєву роль при аналізі довготривалих потоків акустичної інформації. Саме тому визначенню оптимальних параметрів дискретизації спектрограми теж слід приділяти належну увагу. В попередніх розрахунках цієї роботи було використано значення М=256.

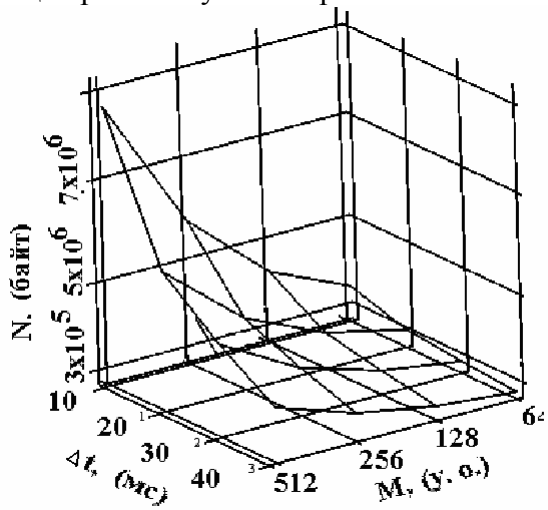


Рис. 9. Залежність розміру файлу даних (тривалість 0,7 с) від розміру часової та частотної дискретизації

У ході проведеного аналізу даних слід зазначити, що використаний метод трансформації задачі розпізнавання акустичного сигналу в задачу розпізнавання зорових образів є перспективним з наступних міркувань:

- по-перше: при такому перетворенні не відбувається невідворотна втрата інформації, яка має місце при використанні інших методів відображення акустичного сигналу [10]. Навпаки, використовуючи обернене перетворення Фур'є, можливо поновити початкову фонему. При цьому ступінь відповідності оригіналу є підконтрольним процесом;
- по-друге: подальше розв'язання проблеми ідентифікації морфем можливо розглядати у рамках напрацьованих розробок та розроблених алгоритмів у галузі ЗРЗО [4; 5; 7; 8].

Висновки

Спираючись на отримані результати, можна зробити висновок, що в ході виконання роботи вдалося перетворити задачу розпізнання звукової інформації на задачу розпізнання зорових образів. Наступним кроком розв'язання цієї проблеми буде створення класифікатора зорових образів, що відповідають мовним фонемам.

Подальші кроки розвитку запропонованого підходу передбачають розробку ефективних алгоритмів часового та частотного нормування спектрограми з метою створення бібліотеки еталонних морфем [11]. Необхідність таких перетворень пов'язана як з наявністю різного темпу мовлення, так і з індивідуальними особливостями тональності людини. Ефективним інструментом для реалізації таких алгоритмів є використання нейронних мереж.

Список використаних джерел

1. Lawrence R. Rabiner, Biing-Hwang Juang / Fundamentals of Speech Recognition. – Prentice Hall, 1993. – 496 p.
2. Вишнякова О. А. Автоматическая сегментация речевого сигнала на базе дискретного вейвлет-преобразования / О. А. Вишнякова, Д. Н. Лавров //Математические структуры и моделирование. – 2011. – Вып.23. – С.43-48.
3. Ермоленко Т. В. Разработка системы распознавания изолированных слов русского языка на основе вейвлет-анализа / Т. В. Ермоленко // Искусственный интеллект. – 2005. – № 4. – С. 595-601.
4. F.R. Bach, M.I. Jordan, Kernel Independent Component Analysis, Journal of Machine Learning Research, Vol. 3, 2002, pp. 1-48.
5. M. Turk, A. Pentland, Eigenfaces for Recognition, Journal of Cognitive Neurosicence, Vol. 3, No. 1, 1991, pp. 71-86.
6. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов / А. Б. Сергиенко – СПб.: Питер, 2002. – 608 с.
7. K. Etemad, R. Chellappa, Discriminant Analysis for Recognition of Human Face Images, Journal of the Optical Society of America A, Vol. 14, No. 8, August 1997, pp. 1724-1733.
8. L. Wiskott, J.-M. Fellous, N. Krueuger, C. von der Malsburg, Face Recognition by Elastic Bunch Graph Matching, Chapter 11 in Intelligent Biometric Techniques in Fingerprint and Face Recognition, eds. L.C. Jain et al., CRC Press, 1999, pp. 355-396.
9. Фролов А. В. Мультимедиа для Windows. Библиотека системного программиста. Т. 15. / А. В. Фролов, Г. В. Фролов. – М.: Диалог-МИФИ, 1994.
10. Данченко О. И. Использование динамических портретов звука при распознавании речевого сигнала / О. И. Данченко, Д. В. Николаенко // Искусственный интеллект. – 2008. – № 1. – С. 139-144.
11. Ермоленко Т. В. Методика формирования эталонов фонем, базирующаяся на вейвлет-преобразовании Морле / Т. В. Ермоленко // Таврический вестник информатики и математики. – 2006. – № 1. – С. 127-132.
12. Грабовая В. А. О системе компьютерного распознавания русской речи с автоматическим построением эталонов / В. А. Грабовая, Е. Е. Федоров, В. Ю. Шелепов // Искусственный интеллект. – 2000. – № 1. – С. 76-81.
13. Круглов В. В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика / В. В. Круглов, В. В. Борисов. – М.: Горячая линия-Телеком, 2002.

УДК 004.312

Є.В. Нікітенко, канд. фіз.-мат. наук
Р.В. Заровський, канд. техн. наук
С.В. Микитко, магістрант
Чернігівський державний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

РОЗПОДІЛЕНА СИСТЕМА ОБРОБКИ ТА ВИВОДУ ВІДЕОДАНИХ

Розглянуті проблеми побудови розподілених систем обробки та виводу відеоданих. Запропоновані методи вирішення виявлених проблем. Розроблена архітектура розподіленої системи обробки та виводу відеоданих.

Вступ

Сучасний рівень розвитку електроніки та обчислювальної техніки дозволяє будувати високопродуктивні комп'ютерні системи цифрової обробки одновимірних та двовимірних сигналів. Одним з яскравих прикладів можливостей таких систем є побудова відеостін.

Основне призначення відеостін – великомасштабне відображення інформації для колективного перегляду в диспетчерських і ситуаційних центрах, на пультах управління, а також у різних автоматизованих системах управління. Вони застосовуються в тих сферах, де необхідний оперативний контроль над інформацією і де виключно велика відповідальність за прийняті управлінські рішення: в енергетиці, на транспорті, телекомунікаціях, промисловості, у системах забезпечення безпеки, в управлінні фінансами, залах засідань, фінансових біржах, а також у рекламній сфері та сфері розваг [1]. Таким чином, у зв'язку з таким різноплановим використанням цієї системи необхідно забезпечити її універсальність для кожного роду застосування. Це означає, що сторонньому розробнику необхідно надати можливість самостійно розширювати функціональні можливості системи.

Постановка проблеми

З технічної точки зору основна проблема побудови комп'ютерної системи, що надає зображення на відеостіну від багатьох відеоджерел, – це забезпечення можливості розширення розмірів самої відеостіни, розширення її програмної функціональності у вигляді додавання нових алгоритмів обробки відеоданих і підключення більшої кількості відеоджерел. Забезпечення таких можливостей пов'язане з нарощуванням обчислювальної потужності комп'ютерної системи на етапі її функціонування. При цьому також існує проблема управління величезним потоком відеоінформації в мережах загального призначення. Рішення цієї проблеми вимагає застосування особливих алгоритмів керування, які передбачають планування маршрутів проходження інформації [2].

Цю систему раціонально організувати як розподілену. При використанні такої топології за кожну клітинку відеостіни відповідає окремий апаратний модуль, який керується централізовано. Таке рішення дозволить досягти високої масштабованості системи, а також ряд інших переваг, таких як зниження загальної вартості системи, зменшення енергоспоживання. Також система підтримує можливість динамічного підключення додаткових програмних модулів обробки відеоінформації.

Викладення основного матеріалу дослідження

Виходячи з аналізу необхідної функціональності, а також таких властивостей, як масштабованість і розподіленість, була запропонована архітектура системи, яка представлена на рисунку 1.

Для реалізації підсистем трансляції відеопотоку й управління відеовиводом можна скористатися технологією DaVinci. Вона являє собою комплекс засобів для конструювання багатофункціональних відеопристроїв. До складу технології входить цифровий сигнальний процесор (DSP), оптимізований для обробки відеоданих, та вбудоване програмне забезпечення, комбінації яких дозволяють створювати уніфіковані відеовідтворювальні і записуючі пристрої. Одним з принципових особливостей платформи DaVinci є розвинені можливості зв'язку таких пристроїв один з одним.

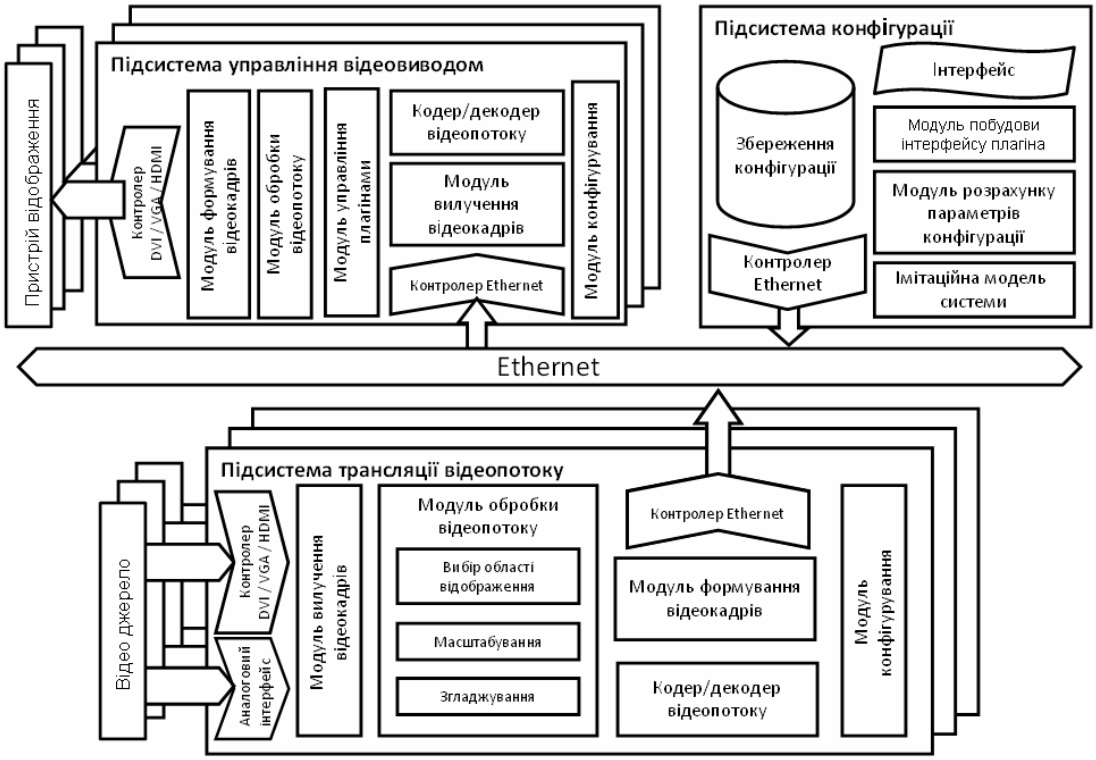


Рис. 1. Архітектура системи

Наявність у процесорі ядра ARM9 дає можливість застосування RTOS на базі Linux, що дозволяє використовувати велику кількість готових бібліотек і рішень, зменшити час розробки та спростити її за рахунок великої кількості готових функцій. Також використання Linux дає можливість динамічно завантажувати бібліотеки, які відіграють роль плагіна, що динамічно додається.

В якості середовища передачі інформації між рознесеними в просторі модулями можна використовувати Ethernet, який дає можливість побудови трирівневої розподіленої архітектури. На нижньому рівні архітектури знаходиться апаратне забезпечення: маршрутизатори, комутатори та ін. На середньому рівні знаходиться оверлейна мережа, що дозволяє об'єднати вузли, доступні тільки через загальну мережу. На вищому рівні знаходяться джерела відеоінформації, система управління відеостіною, модулі відображення відеоінформації на відеостіну [3].

Структура програмного забезпечення

Оскільки дана система забезпечує роботу з деякою кількістю відеоджерел, рознесених у просторі, а вивід на відеостіну передбачає підключення декількох пристроїв відображення, то найбільш ефективним буде застосування розподіленої архітектури системи.

У системі можна виділити 3 підсистеми:

- підсистема трансляції;
- підсистема управління відеовиводом;
- підсистема конфігурування.

Підсистема конфігурування необхідна для роботи оператора відеостіни. Її функцією є управління параметрами відображення різних відеопотоків на відеостіні. Пристрої керування відеовідображенням забезпечують прийом відеопотоку від джерела і його подальшу підготовку для виводу на екран. Підготовка відеопотоку до виведення включає декодування відео, виділення області відображення та масштабування зображення, що виводиться.

Для забезпечення гнучкості налаштування джерела відеопотоку підключаються в систему через спеціалізовані пристрої передачі (підсистема трансляції), які, крім гетерогенності джерел відеосигналу, забезпечують оптимізацію роботи системи.

Плагін – незалежно компільований програмний модуль, що динамічно підключається до основної програми, призначений для розширення її можливостей.

Запропоновано організувати плагін у вигляді двох файлів, один з яких призначений для апаратних модулів системи, на яких встановлена операційна система Linux, а другий є доповненням до програмного забезпечення (ПЗ), за допомогою якого і здійснюється централізоване конфігурування системи. Плагін підключається до апаратного модуля і буде здійснювати обробку відеозображення [4]. З технічної точки зору він є бібліотекою Linux, яка динамічно завантажується. Доповнення підключається до керуючого ПЗ і відповідає за налаштування плагіна на апаратному модулі. Це доповнення є XML-файлом, який описує інтерфейс користувача, необхідний для налаштування параметрів плагіна. Цей спосіб опису інтерфейсу користувача є універсальним і не залежить від особливостей платформи, на якій розроблено ПЗ керування відеостіною.

Ця комп'ютерна система видає зображення на відеостіну і підтримує накладання відразу декількох відеоефектів на зображення. Для взаємодії основної програми і плагіна необхідний програмний інтерфейс. Продуманість і чіткий опис цього інтерфейсу дозволяє стороннім розробникам безперешкодно розробляти плагіни для цієї комп'ютерної системи [5].

Підключення плагіна до апаратного модуля здійснюється засобами операційної системи Linux. У результаті плагін надає набір функцій, назви яких чітко визначено описом інтерфейсу, що необхідно для ідентифікації функцій основною програмою. Набір і опис функцій плагіна, що підключається до апаратного модуля, наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Опис функцій плагіна апаратного модуля

Назва	Опис
getName	Повертає назву підключеного плагіна
getVersion	Повертає версію підключеного плагіна
getId	Повертає унікальний ідентифікаційний номер плагіна
getDescription	Повертає опис плагіна
doFilter	Здійснює обробку RGB зображення, що представлено двовимірним масивом

Таким чином, можна представити структуру плагіна, що підключається до апаратного модуля. Структура плагіна показана на рисунку 2.

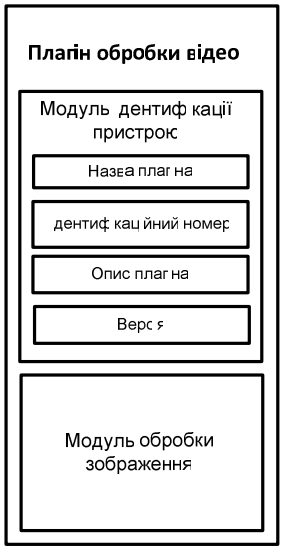


Рис. 2. Структура плагіна, що підключається до апаратного модуля

Оскільки на зображення, що виводиться, може накладатися відразу кілька відеоефектів, необхідно сказати, що зображення буде оброблятися кожним плагіном по черзі. Положення у черзі задається адміністратором системи. Також плагін бере на себе відповідальність за вилучення та обробку параметрів, що адресовані йому від керуючого ПЗ. З цього випливає,

що параметри, прийняті з керуючого ПЗ, передаються наскрізь у плагін, тобто як безтипові дані по відношенню до основної програми апаратного модуля. Необхідно сказати, що інформація про самі плагіни, що доступні на цьому апаратному модулі, буде завантажена під час завантаження модуля, а також за приходом службової команди з керуючого ПЗ про додавання нового плагіна. Основна програма модуля містить список всіх доступних на цей момент плагінів і коротку інформацію про них, а саме ідентифікаційний номер, назву плагіна, версію та ім'я файлу, що являє собою сам плагін. Таким чином, плагіни будуть завантажені в пам'ять модуля тільки тоді, коли вони беруть участь у ланцюжку обробки відеозображення. На рисунку 3 показана структура списку доступних плагінів.

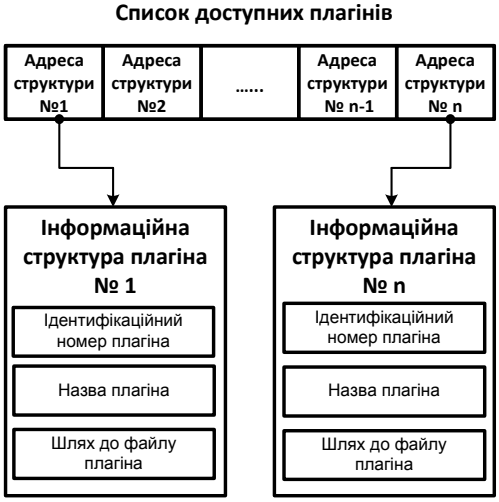


Рис. 3. Структура списку доступних плагінів

Відеозображення обробляється певним списком плагінів і в певній послідовності, що задано адміністратором, будується ланцюжок обробки. Всі плагіни в цьому ланцюжку повинні бути завантажені в пам'ять модуля, тому що вони містять функцію обробки відео, яка буде викликана для накладення ефектів на зображення. Схема ланцюжка обробки зображення показана на рисунку 4.

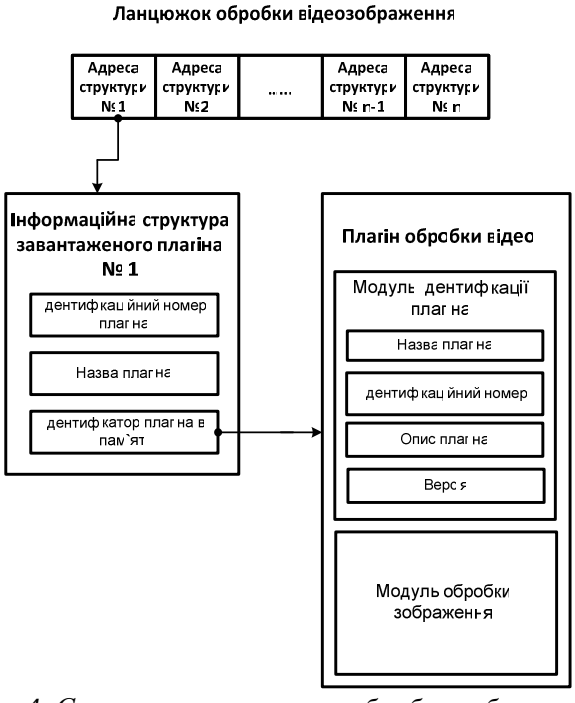


Рис. 4. Структура ланцюжка обробки зображення

Плагіни в цій розподіленій комп'ютерній системі поширюються централізовано з керуючого ПЗ на програмне забезпечення апаратних модулів. Таким чином, установка плагінів на апаратний модуль відбувається віддалено.

Для налаштування плагіна необхідний інтерфейс користувача. Опис інтерфейсу здійснюється за допомогою технології XML. Це значить, що інтерфейс описується XML-файлом, який, у свою чергу, аналізується керуючим ПЗ і на основі якого власне і відбувається побудова графічного інтерфейсу. Структура XML-файлу показана на рисунку 5.

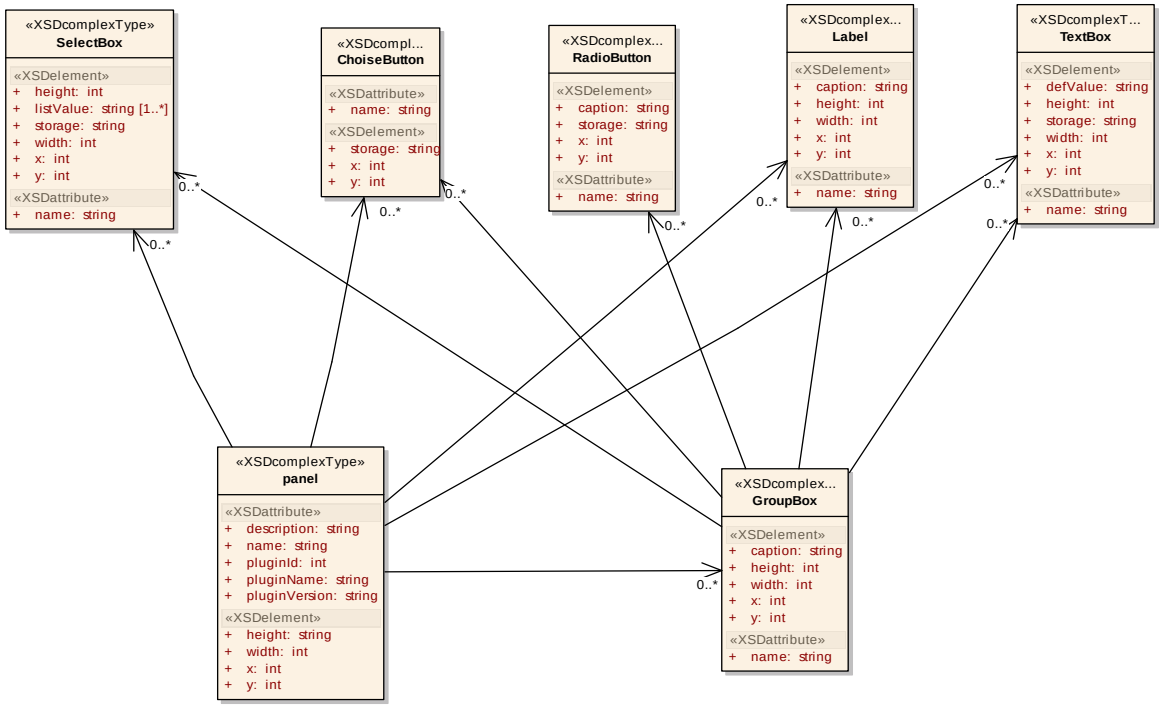


Рисунок 5. Структура XML файлу, що описує інтерфейс

Для підключення плагіна до керуючого програмного забезпечення необхідний XML-файл з описом інтерфейсу. Після чого система проаналізує цей файл і побудує інтерфейс користувача для налаштування плагіна. Після введення всіх налаштувань користувачем система сформує пари параметр-значення відповідно до поля storage в описі компонента в XML-файлі.

Висновки

Архітектура системи забезпечує об'єднання відеопотоків різного формату, в результаті чого користувач зможе спостерігати комплексне зображення. Розроблена архітектура підтримує можливість розширення функціональності системи за рахунок динамічного додавання алгоритмів обробки відеопотоку в реальному режимі часу.

Використання розподіленої архітектури системи дозволяє підвищити верхній поріг продуктивності обробки відеопотоку в реальному режимі часу за рахунок паралельного виконання алгоритмів відеообробки. А введена в систему підтримка плагінів дозволяє істотно розширити функціональність системи і надає можливість стороннім розробникам доповнювати систему власними модулями.

Список використаних джерел

1. Xuesong Cao, Zhaoping Wang, Ruimin Hu, Jun Chen, «An overlay-based service architecture for distributed video surveillance system», April, 2008, p. 211-214.

2. C. Y. Chan, and Jack Y. B. Lee, «A Decentralized Scheduler for Distributed Video Streaming in a Server-less Video Streaming System», 2009, p. 57-62.

3. Гук И. Краткий обзор цифровых сигнальных процессоров DaVinci / И. Гук // Компоненты и технологии. – 2007. – № 3. – С. 150-160.

4. Фисенко В. Т. Компьютерная обработка и распознавание изображений: учеб. пособие / В. Т. Фисенко, Т. Ю. Фисенко. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2008. – 192 с.

5. Видеостены и качество передачи изображения на составных полиэкранах [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://kljuch.ru/videosteny-s-kachestvo-peredachi-izobrazheniya-na-sostavnyh-poliekranah/. – Название с экрана. – Дата доступа 11.05.2011.

УДК 004.94:519.876

Р.Ю. Лопаткин, канд. физ.-мат. наук
В.А. Иващенко, аспирант
Институт прикладной физики НАН Украины, г. Сумы, Украина

ЯЗЫК ПРОГРАММИРОВАНИЯ GROOVY КАК СРЕДСТВО ОПИСАНИЯ МУЛЬТИАГЕНТНЫХ МОДЕЛЕЙ

В данной статье авторами предлагается использование методологии метапрограммирования для упрощения описания мультиагентных моделей, предложена архитектура среды для мультиагентного моделирования в рамках данного подхода, а также решаются связанные с этим подходом технические вопросы.

Введение

Перед разработчиками среды имитационного моделирования всегда стоит задача предоставления пользователю некоторого интерфейса для описания моделей. Обычно исследователю предоставляется возможность описывать модель либо с помощью специального графического интерфейса, либо используя языки программирования. Понятно, что первый подход может обеспечить значительное упрощение процесса описания моделей, а второй – его гибкость. Для совмещения преимуществ обоих подходов, с нашей точки зрения, напрашивается использование графических интерфейсов для задания параметров модели, а для описания модели – использовать язык программирования.

Описания моделей с помощью языка программирования возможно несколькими способами:

1. Интегрировать скриптовый язык в систему моделирования, написанную на компилируемом языке программирования. Примером такой связки могут быть язык программирования C++ и скриптовый язык Luna Lua или Angel Script. Преимуществом первого подхода может быть эффективное обеспечение безопасности – код скриптового языка часто (но не всегда) выполняется в специальной защищенной среде, за пределы которой скрипт не имеет доступа. Но такой подход может иметь недостатки относительно обеспечения взаимодействия среды моделирования с моделью, поскольку для полноценного взаимодействия необходимо, чтобы среда моделирования имела доступ к любой переменной, любой функции модели, а модель, в свою очередь, – наоборот, должна иметь доступ к переменным среды моделирования. Еще очевидный недостаток такого подхода – отсутствие кроссплатформенности разработанной программы, что является критическим фактором при разработке распределенных систем.

2. Описывать модели на том же языке, на котором разработана среда моделирования. Такой подход может обеспечить высокое быстродействие в случае, если идет речь о компилируемом языке программирования, но возникают вопросы с безопасным выполнением кода модели, а также с гибкостью интеграции модели и среды моделирования. Для решения вопросов безопасности в таком случае придётся создавать или использовать готовую виртуальную машину, что не всегда удобно и может збавить от преимущества в скорости выполнения. Также как и в первом случае не обеспечивается кроссплатформенность разработанного решения. Подобный подход может быть приемлем, если среда моделирования предназначена для запуска на локальной машине, но неприемлем при распределенном моделировании. Примером такой системы может

служить PSim [1]. Но совсем по-другому может обстоять вопрос, если среда разработана на интерпретируемом языке и на этом же языке описываются модели.

3. Альтернативой первым двум подходам может быть разработка специального скриптового языка, который изначально будет ориентирован для решения поставленной задачи. Однако это требует значительных трудозатрат и на его реализацию может уйти много времени. Такой подход реализован, например, в NetLogo [2].

Основная часть

Таким образом, каждый из этих подходов имеет свои преимущества и недостатки. Как мы считаем, использование платформы Java решает множество проблем, присущих рассмотренным подходам: она обеспечивает кроссплатформенность разработанных приложений, решает немаловажный вопрос безопасности выполнения кода моделей. Вопрос безопасности становится особо остро в случае создания распределенных систем моделирования, когда код модели может передаваться системе моделирования с удаленной машины. А, как известно, вопросы безопасности и ограничения доступа для кода можно решать с помощью стандартных средств платформы Java, которые сильно развиты [3]. Но, с другой стороны, при использовании платформы Java возникают некоторые проблемы с гибкостью созданных решений, избыточностью кода моделей не только в плане избыточности самого кода Java, но и в плане наличия в таком случае множества «шаблонных» конструкций, присущих моделям.

Но эти проблемы можно решать использованием современных языков программирования, ориентированных на платформу Java, реализующих новые концепции программирования не присущие языку Java. Поэтому с целью создания основы специализированного языка программирования для описания моделей мы использовали Groovy [4], как одну из самых удачных, на наш взгляд, реализаций такого языка, поддерживающего концепцию метапрограммирования.

На рисунке 1 схематически представлена, предлагаемая нами, архитектура среды мультиагентного моделирования, которая позволила бы использовать платформу Java в сочетании с Groovy, обеспечивая простую интеграцию и, кроме того, делать надстройки над языком программирования Groovy для решения, указанных выше, проблем.

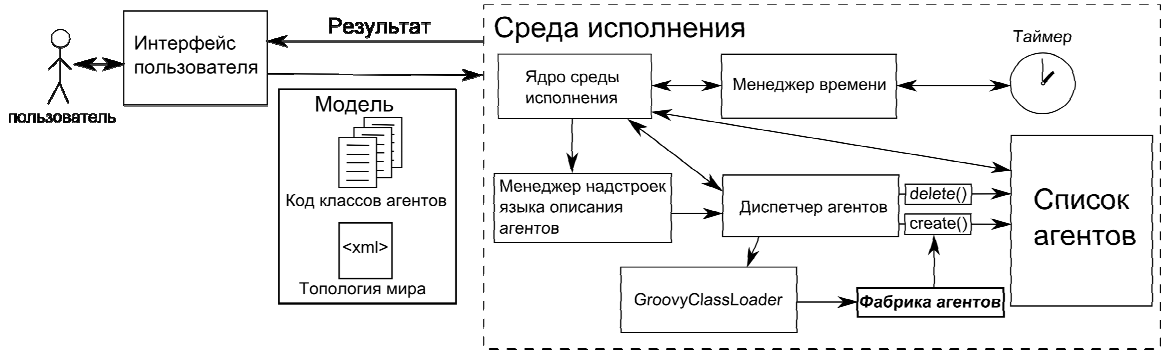


Рис. 1. Архитектура системы мультиагентного моделирования

Как видно из рисунка, пользователь с помощью *интерфейса пользователя* описывает модель и передает её далее *среде исполнения* модели в виде *кода классов агентов* и файла в формате XML, в котором задаются характеристики модельного мира. В самом начале *ядро среды исполнения* обращается к *менеджеру надстроек языка описания агентов* и с его помощью активирует надстройку Groovy, которая является набором языковых конструкций, позволяющих описывать логику агентов. Все надстройки, используемые *менеджером надстроек описания агентов,* хранятся в одном отдельном файле, поэтому простая замена этого файла обеспечивает поддержку новых конструкций, которые могут быть разработаны в рамках рассматриваемого подхода.

Все активные агенты создаются, хранятся и удаляются из *списка агентов* только *диспетчером агентов*, что происходит после команды *ядра среды исполнения*, которое осуществляет изменение состояний агентов во времени, а также взаимодействует с *менеджером времени*, отвечающим за продвижение модельного времени. Для создания новых агентов модельного мира *диспетчер агентов* использует *фабрику агентов*, которая создается с помощью класса *GroovyClassLoader*.

Покажем на примере, как можно использовать надстройки Groovy для упрощения описания моделей, избавления от часто используемых строчек кода. Рассмотрим в качестве примера известную модель «хищник-жертва». Описание класса агента-хищника может выглядеть следующим образом:

```
class Wolf extends AbstractAgent {
Random rand;
double x,y;
double min_x = 0.0;   //Эти переменные обязательны
double min_y = 0.0;   //и служат для ограничения
double max_x = 100.0; //мира, за пределы которого
double max_y = 100.0; //агенты не могут выходить
…
public Wolf() {
            rand = new Random();
            x = min_x+rand.nextDouble()*(max_x-min_x);
            y = min_y+rand.nextDouble()*(max_y-min_y);
 }
   …
}
```

Переменные `min_x`, `min_y`, `max_x`, `max_y` в данном случае используются как границы модельного мира, в котором могут существовать хищники, а x и y задают координаты агента в двухмерном пространстве. Как видно из конструктора класса, он создает агентов в рамках модельного мира с равномерным законом распределения координат.

Теперь, если рассмотреть «жизнедеятельность» агента, то становится понятно, что переменные `min_x`, `min_y`, `max_x`, `max_y` обязательны к использованию:

```
 // «Передвижение волка»
 int sign = Math.abs(rand.nextInt())%2;
 if(sign==1){
 x = x + delta;
 if(x>max_x) x = max_x;
 }
 else{
x = x - delta;
if(x<min_x) x = min_x;
 }

 sign = rand.nextInt()%2;
 if(sign==1){
y = y + delta;
if(y>max_y) y = max_y;
 }
 else{
```

```
y = y - delta;
if(y<min_y) y = min_y;
 }
```

Жирным курсивом выделен код, который приходится использовать в каждой подобной модели, но от него желательно было бы избавиться.

Теперь рассмотрим, как можно избавиться от такого кода с помощью метапрограммирования, например, с использованием языка Groovy. Во-первых, генерацию координат, создаваемых агентов, в таком случае можно осуществлять более простым и понятным образом:

```
class Wolf extends AbstractAgent {
def x = [0.0,100.0].random
def y = [0.0,100.0].random
…
}
```

Во-вторых, запретить выход чисел за пределы указанного диапазона можно на уровне самого языка и код в таком случае будет выглядеть следующим образом:

```
int sign = Math.abs(rand.nextInt())%2;
if(sign==1)
   x = x + delta;
else
   x = x - delta;

sign = Math.abs(rand.nextInt()%2);
if(sign==1)
   y = y + delta;
else
   y = y - delta;
```

Здесь гарантируется, что значение переменных `x` и `y` не выйдет за пределы отрезка `[0.0,100.0]`. Отметим, что такая запись возможна только при условии применения специальной надстройки над языком Groovy.

Рассмотрим подробно код этой надстройки. В примере происходит присваивание `def x = [0.0,100.0].random`, где конструкция `[0.0,100.0]` создает новый список из двух действительных чисел 0.0 и 100.0. Мы имеем возможность создать для этого списка метод получения случайного числа, заключенного между двумя этими числами, следующим образом:

```
ArrayList.metaClass{
 getRandom{->
def (mn,mx) = delegate
new Double(mn,mx)
       //возвращаем новую переменную типа Double
}
}
```

В данном коде происходит расширение функционала уже существующего класса `ArrayList`, представляющего собой список. В переменные `mn` и `mx` записываются значения концов отрезка, а затем происходит вызов конструктора стандартного типа `Double`. Расширение функциональности класса `Double` происходит следующим образом:

```
Double.metaClass{
def oldPlus = Double.metaClass.getMetaMethod("plus",
 [Integer] as Class[])
def oldMinus = Double.metaClass.getMetaMethod("minus",
 [Integer] as Class[])
double min
double max
Random Rand = new Random()
getMin={->min}
setMin={->min = delegate}
getMax={->max}
setMax={->max = delegate}
constructor={double mn, double mx->
min = mn
max = mx
return min+(max-min)*Rand.nextDouble()
//Записываем значение только что созданной переменной Double
 }
plus = {Double n->
def res = oldPlus.invoke(delegate,n)
if(res<=max)
return res;
else
return max;
}
minus = {Double n->
def res = oldMinus.invoke(delegate,n)
if(res>=min)
return res;
else
return min;
}
}
```

Теперь в классе `Double` появились дополнительные поля: `min` – допустимое минимальное значение числа, `max` – допустимое максимальное значение числа, методы для их получения и установки: `getMin`, `setMin`, `getMax`, `setMax`. Добавленный новый конструктор записывает границы допустимых значений числа и генерирует случайным образом значения для числа с учетом границ. А также происходит переопределение операций «+» и «–», которые уже не позволяют числу выходить за рамки его диапазона.

Как видно, оптимизация кода возможна не только потому, что код на Groovy менее избыточный, чем на Java, но и еще за счет возможности избавиться от шаблонных конструкций посредством метапрограммирования или заменить их форму записи на более удобную.

Необходимо отметить, что разработчики известной среды моделирования Repast Symphony [5] используют Groovy для описания моделей, но в данном программном продукте реализованы только базовые надстройки, которые нет возможности модифицировать до полноценного специализированного языка. Реализованная нами схема позволяет существенно упростить для пользователя процесс описания моделей. При этом для разработчиков открываются новые возможности создания плагинов в виде языковых конструкций, которые легко могут подключаться к разрабатываемой нами системе агентного моделирования.

Предложенный подход также позволяет просматривать и задавать параметры агентов с помощью графического интерфейса. Например, предположим, что у класса Wolf есть следующие свойства:

```
class Wolf extends AbstractAgent {
 def max_life = 6
 def life = max_life
 def eat_distance = [0.0,50.0].number
 def delta = [0.0,50.0].number
 def max_hungry = 4
 def hungry = 2
 …
}
```

Этому коду будет соответствовать графический интерфейс, который показан на рис. 2:

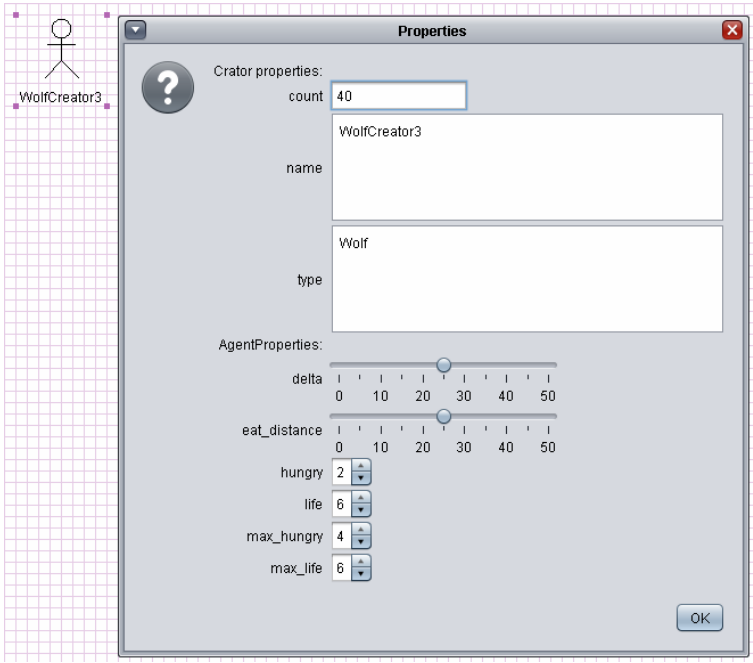


Рис. 2. Графический интерфейс пользователя для задания параметров агента

Получать или устанавливать свойства агента подобным образом можно с помощью технологии Groovy Beans [4].

Выводы

Предложенный нами подход, основанный на Groovy, в сочетании с предложенной архитектурой построения системы мультиагентного моделирования, позволяет, с одной стороны, использовать преимущества платформы Java, а с другой – устраняет некоторые недостатки стандартного языка программирования Java, которые касаются построения подобных систем и были перечислены выше. К преимуществам в данном случае можно отнести: полное разделение логики модели и интерфейсов управления, гибкость и кроссплатформенность создаваемых решений, безопасность выполнения моделей, что не всегда присуще другим кроссплатформенным решениям.

Список использованных источников

1. PSIM Software by Powersim Inc [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.powersimtech.com/. – Заголовок с экрана.

2. NetLogo [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://ccl.northwestern.edu/netlogo/. – Заголовок с экрана.

3. Java SE Security [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.oracle.com/technetwork/java/javase/tech/index-jsp-136007.html. – Заголовок с экрана.

4. Groovy - Home [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://groovy.codehaus.org/. – Заголовок с экрана.

5. C.M. Macal. Repast Simphony Runtime System, in C.M. Macal, M.J. North, and D. Sallach (eds.), Proceedings of the Agent 2005 Conference on Generative Social Processes, Models, and Mechanisms, ANL/DIS-06-1, cosponsored by Argonne National Laboratory and The University of Chicago, Oct. 13–15, 2005.

УДК 621.365.9:620.197.3

В.П. Войтенко, канд. техн. наук
А.А. Королев, канд. техн. наук
П.К. Комзол, студент
Черниговский государственный технологический университет, г. Чернигов, Украина

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С ЦИФРОВЫМ КВАЗИОПТИМАЛЬНЫМ РЕГУЛЯТОРОМ В ПОТЕНЦИОСТАТЕ

С учетом возможностей, предоставляемых современной элементной базой систем информационной и энергетической электроники, сформулированы требования к потенциостату для исследований в области электрохимической коррозии. Предложены функциональные схемы, а также алгоритмы работы как резидентной части прибора, так и прикладного программного обеспечения для персонального компьютера.

Введение

Потенциометрия представляет собой широко распространенный метод определения различных физико-химических величин, основанный на измерении электродвижущих сил сопряженных электрохимических процессов. Потенциометрия, в частности, находит применение при разработке эффективных ингибиторов коррозии [1; 2]. Исследования обычно проводят с использованием потенциостата, представляющего собой сложный и дорогостоящий прибор, позволяющий с высокой точностью поддерживать заданный потенциал или ток рабочего электрода, изменять их по требуемому закону, а также измерять и регистрировать потенциал рабочего электрода и тока поляризации [3; 4].

Современная элементная база электронных систем и достижения в области как силовой, так и информационной электроники позволяют разработать устройство, которое не только не будет уступать известным моделям, а наоборот, сможет существенно превзойти их по ряду параметров, предложить новые возможности и, в то же время, быть доступным как для исследовательских, так и для учебных лабораторий [5; 6].

Целью данной статьи является разработка концепции построения потенциостата нового поколения, способного существенно повысить эффективность потенциометрических экспериментов.

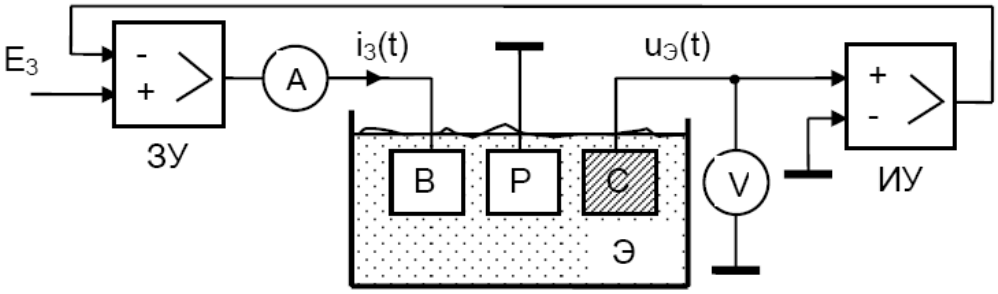
Формулирование требований к потенциостату

Очевидно, что проектируя потенциостат нового поколения, в качестве его базовых характеристик можно взять те, которые используются для оценки существующих приборов. Однако большинство количественных параметров, а также реализуемые функции решающим образом зависят от области применения прибора. Разумеется, можно создать универсальный потенциостат для всех требуемых на сегодняшний день применений, но такое решение будет наименее эффективным. Стоимость самого прибора, его эксплуатации и обслуживания, сложность работы с ним могут оказаться чрезмерными, и, в то же время, ряд функций останутся невостребованными. Поэтому более рациональным решением является подход, сочетающий в себе два начала: модульность и использование программируемой логики. И то, и другое позволяет рентабельно произво-

дить и единичные образцы, и, благодаря гибкости этого подхода, быстро выходить на рынок с новыми разработками при появлении соответствующей потребности. В данной работе диапазон применения потенциостата ограничен исследовательскими и учебными задачами, но может быть расширен за счет использования как аппаратных, так и программных модулей с другими параметрами без изменения базовой концепции.

С целью выяснения основных требований, предъявляемых к потенциостату, был проанализирован ряд работ, посвященных исследованиям коррозионной устойчивости различных материалов [1; 2 и др.]. В итоге выполненного обзора установлено, что наиболее часто используемые методики опираются на измерения поляризационных катодных и анодных кривых в относительно узких диапазонах токов и напряжений. При этом точность задания и стабилизации как напряжения, так и тока должна быть весьма высокой. Поскольку электрохимические процессы относительно медленные, требования к динамическим характеристикам формирующей и измерительной подсистем прибора могут быть выполнены в полном объеме даже при их программной реализации. Это открывает путь к использованию продвинутых алгоритмов управления процессами, весьма требовательных к вычислительным ресурсам [5; 7].

Конфигурация и подключение электронных узлов к электрохимической ячейке зависят от того, какой именно параметр процесса поддерживается на фиксированном уровне. Так, на рис. 1 приведена упрощенная схема работы потенциостата в режиме стабилизации заданного потенциала рабочего электрода.



$E_З$ – задаваемый потенциал; ЗУ – задающий усилитель; $i_З(t)$ – ток поляризации; Э – электрохимическая ячейка; В, Р и С – вспомогательный, рабочий и сравнения электроды, соответственно; $u_Э(t)$ – потенциал поляризации; ИУ – измерительный усилитель
Рис. 1. Схема работы потенциостата в режиме стабилизации заданного потенциала

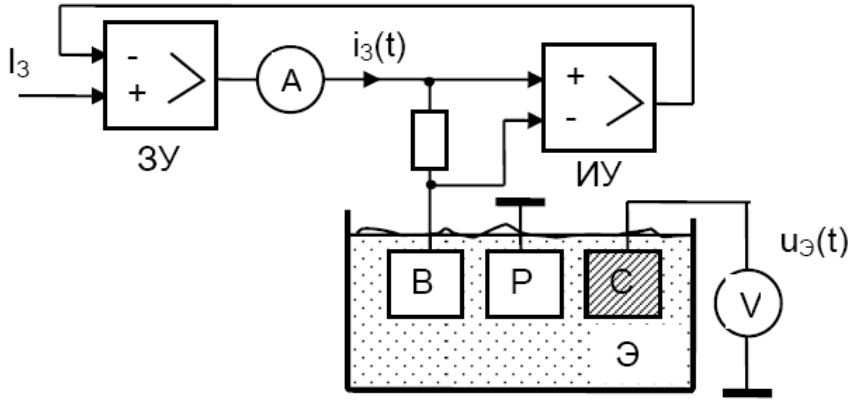
Измерительный усилитель формирует сигнал, пропорциональный напряжению на электроде сравнения относительно рабочего электрода, а задающий усилитель обеспечивает такой ток поляризации, который поддерживает напряжение $u_Э(t)$, равное заданному. Токи утечки в цепи измерительного усилителя не должны превышать $I_y=10^{-8}A$, чтобы минимизировать влияние измерительного блока на электрохимическую ячейку. В процессе экспериментальных исследований наиболее часто приходится иметь дело с потенциалом поляризации в диапазоне *±2 В* [1]. Тогда входное сопротивление измерительного усилителя должно быть не менее *200 МОм*.

Наиболее удобным и общим методом исследования является измерение не тока поляризации *I*, а плотности тока *J:*

$$J = I/s, \quad (1)$$

где *s* – площадь рабочего электрода, $м^2$. Типичные значения плотности тока лежат в диапазоне от $J_{min}=10^{-2}А/м^2$ до $J_{умах}=10^{3}А/м^2$. Для образца площадью $s=0{,}4\cdot10^{-4}\ м^2$ из (1) рабочие токи потенциостата должны лежать в диапазоне от $I_{min}=0{,}4\cdot10^{-6}А$ до $I_{умах}=40\cdot10^{-3}А$.

На рис. 2 приведена упрощенная схема работы потенциостата в режиме стабилизации заданного тока поляризации.



$I_З$ – задаваемый ток

Рис. 2. Схема работы потенциостата в режиме стабилизации тока поляризации

Под сигналом задания тока $I_З$ здесь понимается некое опорное напряжение, подаваемое с задатчика на неинвертирующий вход измерительного усилителя.

Обе приведенные схемы очень важны с точки зрения постановки задачи и являются отправной точкой для дальнейшей работы по проектированию потенциостата.

Широкое внедрение в практику эксперимента персонального компьютера делает перспективной разработку приборов, поддерживающих распространенные стандартные интерфейсы. По этим интерфейсам на блок формирования управляющих воздействий передаются команды, а с блока измерения снимаются результаты воздействия на исследуемый процесс. Персональный компьютер при этом решает несколько задач. Во-первых, – это реализация человеко-машинного интерфейса. Из прибора удаляются два принципиально важных узла: органы ввода и система отображения информации. Их заменяют обязательные для любого современного персонального компьютера клавиатура (мышь, тачпад и пр.), а также видеомонитор. Это позволяет снизить стоимость прибора, габариты и энергопотребление, затраты на обслуживание, повысить надежность, улучшить ремонтопригодность. Во-вторых, гораздо удобнее регистрация полученной об объекте информации, ее последующая обработка и анализ средствами персонального компьютера. В-третьих, упрощение подготовки и проведения исследования благодаря использованию режима диалогового взаимодействия (меню, подсказок), комплексной автоматизации эксперимента. В итоге появляется новая задача, стоящая перед разработчиком прибора – реализация алгоритмов предварительной обработки как входных, так и выходных данных, а также визуализации этих данных (*software*).

На рынке представлены потенциостаты, поддерживающие обмен с персональным компьютером по последовательному интерфейсу *RS-232*. Такое решение в настоящее время устарело по ряду причин. Наиболее перспективным можно считать использование универсальной последовательной шины (*USB*). Это автоматически приводит к необходимости применения в приборе программируемой логики, а следовательно, – и разработки программного обеспечения встроенной системы (*firmware*). Важной особенностью современного этапа развития встроенных систем является хорошо отлаженная типовая технология их проектирования, своего рода унификация. Схемотехника становится рутинной, зато роль прикладного программного обеспечения доминирует и по влиянию на характеристики, и по трудоемкости разработки, сопровождения и обслуживания прибора.

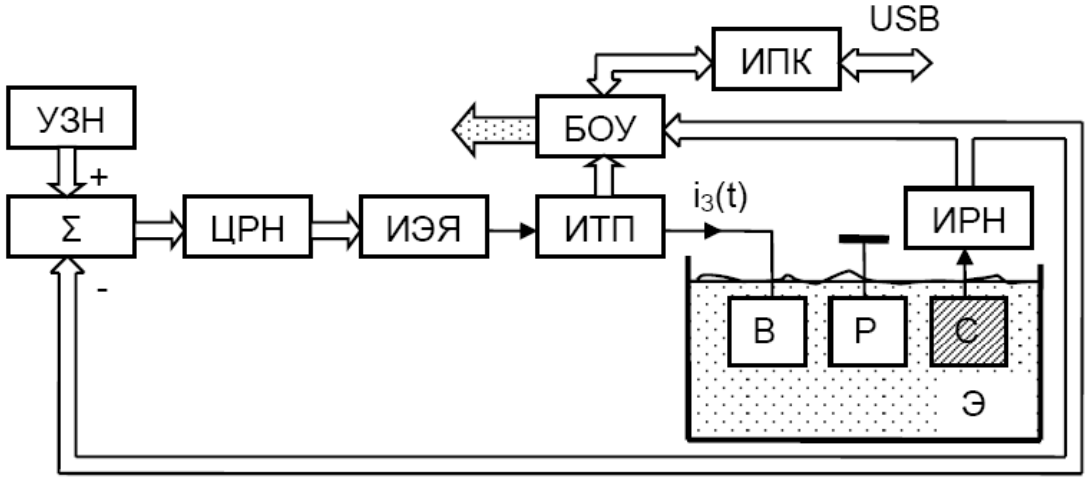
Несколько иначе обстоит дело с проектированием аналоговой части прибора. Здесь могут понадобиться и нетривиальные решения, основанные на искусстве схемотехники. В первую очередь, нужно обратить внимание на построение измерительных усилителей, минимизацию входных токов, которые следует поддержать также и конструктивно-технологическими мерами.

Задача проектирования формирователей выходных сигналов потенциостата также является нетривиальной, учитывая высокие требования по точности поддержания параметров. Свою лепту в комплекс проблем вносит требование обеспечения долговременной стабильности в процессе проведения эксперимента. Типичное решение с аналоговым заданием и аналоговой стабилизацией не имеет перспектив. Использование в приборе цифровых технологий позволяет применить цифро-аналоговый преобразователь и аналоговый усилитель на выходе. Однако последний, вследствие проблем с дрейфом постоянной составляющей выходного сигнала, автоматически становится слабым звеном всей системы.

Предлагается другой подход к построению формирующего узла, а именно: использование методов *широтно-импульсной модуляции* (ШИМ). Цифровая программно-аппаратная реализация модулятора позволяет реализовать высокостабильный и изменяемый в очень широком диапазоне (например, 2^{16} шагов дискретизации на период) сигнал управления импульсным преобразователем. Учитывая необходимость изменения полярности напряжения на рабочем электроде электрохимической ячейки, а также направления тока поляризации, данный преобразователь должен быть *реверсивным*. Для сглаживания пульсаций выходного напряжения придется также поставить *фильтр*, однако, учитывая возможность работы современных силовых вентилей на частотах вплоть до *1 МГц*, габариты этого фильтра и его стоимость не будут большими. Эффективным может стать применение *активного* фильтра.

Синтез структуры потенциостата

С учетом изложенных выше рекомендаций, разработана представленная на рис. 3 функциональная схема потенциостата при его работе в режиме стабилизации напряжения, а на рис. 4 – тока поляризации электролитической ячейки. Главная особенность этих схем – ориентация на широкое использование цифровых и импульсных технологий, обеспечивающих значительно более высокую стабильность и повторяемость характеристик, а также облегчение двустороннего обмена с персональным компьютером, который, по сути, также является цифровым устройством.

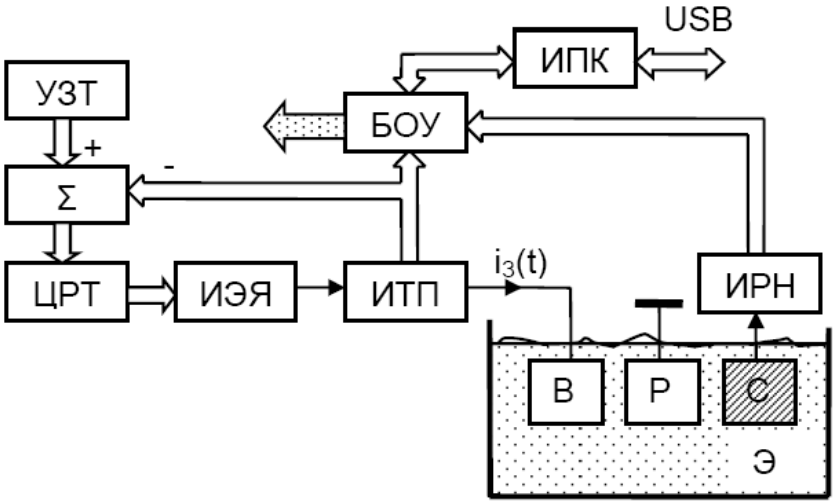


УЗН – устройство задания напряжения; ЦРН – цифровой регулятор напряжения; ИЭЯ – интерфейс с электрохимической ячейкой; ИТП – измеритель тока поляризации; БОУ – блок обработки и управления; ИПК – интерфейс с персональным компьютером; ИРН – измеритель рабочего напряжения

Рис. 3. Функциональная схема потенциостата в режиме стабилизации напряжения

Стабилизация уровней напряжения на электроде сравнения или тока поляризации реализованы с помощью цифровых замкнутых систем автоматического управления. Задание напряжения (тока) осуществляется путем подачи цифрового кода задания на сумматор, на выходе которого формируется код рассогласования. Этот код несет ин-

формацию об ошибке (отклонении) напряжения или тока и является входным сигналом для цифрового регулятора. Наилучшим выбором здесь будет использование квазиоптимального регулятора [5; 7], который обеспечит высокую точность стабилизации, а также качество переходного процесса, столь необходимое для экспериментов, в ходе которых выходной параметр должен изменяться по требуемому закону.



УЗТ – устройство задания тока; ЦРТ – цифровой регулятор тока

Рис. 4. Функциональная схема потенциостата в режиме стабилизации тока поляризации

Решающее значение в вопросе выбора типа регулятора играет не только точность, но также и неоднозначность химических процессов, сложность создания их модели, а следовательно, – необходимость адаптации к изменению как внешних факторов, так и характеристик самого процесса.

Одним из важнейших узлов системы является интерфейс с электрохимической ячейкой, т.е. устройство, преобразующее код управления, выработанный ЦРН, в соответствующий ток поляризации. Наиболее перспективным решением следует считать применение связки: цифровой широтно-импульсный модулятор, реверсивный широтно-импульсный преобразователь и сглаживающий фильтр. Такой подход обеспечит хорошие динамические свойства, высокую энергетическую эффективность и надежность.

В основе построения измерителей тока поляризации и рабочего напряжения лежат высокоточные операционные усилители и аналого-цифровые преобразователи.

Блок обработки и управления принимает и декодирует полученные от персонального компьютера команды, формирует корректные управляющие сигналы для других устройств в составе системы, а также организует сбор, предварительную обработку и передачу цифровых данных о рабочем напряжении и токе поляризации в персональный компьютер.

Элементной базой для построения блока обработки и управления могут служить микроконтроллеры семейств ARM, AVR и др. Благодаря наличию широкой номенклатуры резидентных аппаратных средств (широтно-импульсных модуляторов, аналого-цифровых преобразователей, инерфейсов и пр.) это позволит наиболее эффективно реализовать ряд представленных на рис. 3 и 4 узлов.

Особенности программного обеспечения потенциостата

Основным приемом написания программного обеспечения для рассматриваемого класса устройств является разбиение всей программы на модули. В данном случае целесообразно выделить две основные составляющие программного обеспечения: хост-программа для персонального компьютера и резидентная программа для встроенного микроконтроллера. Критически важной составляющей успеха проектирования предложенных структур является создание надежной связи между двумя составляющими при-

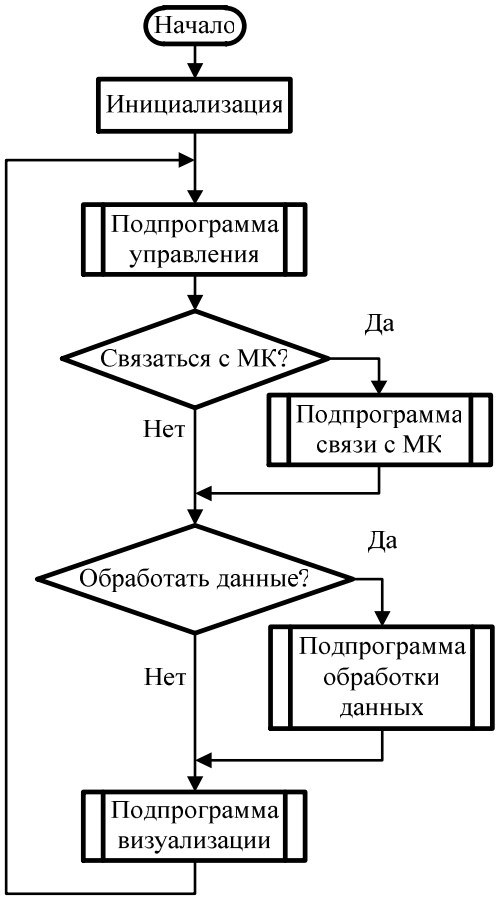


Рис. 5. Алгоритм программы персонального компьютера

кладного программного обеспечения. Выбор интерфейса передачи данных должен соответствовать уровню существующей аппаратной базы. Оптимальным вариантом является использование USB интерфейса.

На рис. 5 показан алгоритм программы для персонального компьютера, а на рис. 6 – для встраиваемого микроконтроллера. Блок «Инициализация» выполняет начальные установки аппаратных средств компьютера. «Подпрограмма управления» является основной составляющей программы и отвечает за задание необходимых параметров и алгоритмов обработки. «Подпрограмма связи с МК» необходима для получения и отправки данных на встраиваемый микроконтроллер.

«Подпрограмма обработки данных» выполняет операции подготовки полученных данных для хранения и дальнейшей обработки средствами персонального компьютера. «Подпрограмма визуализации» выполняет прорисовку пользовательского интерфейса и вывод всей необходимой информации на монитор персонального компьютера. Программа после запуска выполняется в цикле.

Блок «Инициализация» программы для встраиваемого микроконтроллера выполняет настройку резидентных аппаратных средств. «Подпрограмма связи с ПК» отправляет собранные данные на персональный компьютер, а также получает инструкции для формирования необходимых параметров задающих воздействий на электрохимической ячейке. «Подпрограмма АЦП» управляет встроенным аналого-цифровым преобразователем для получения данных с электрохимической ячейки. «Подпрограмма ШИМ» управляет цифровым широтно-импульсным модулятором для задания параметров на электродах электрохимической ячейки. Программа выполняется в цикле после включения питания микроконтроллера.

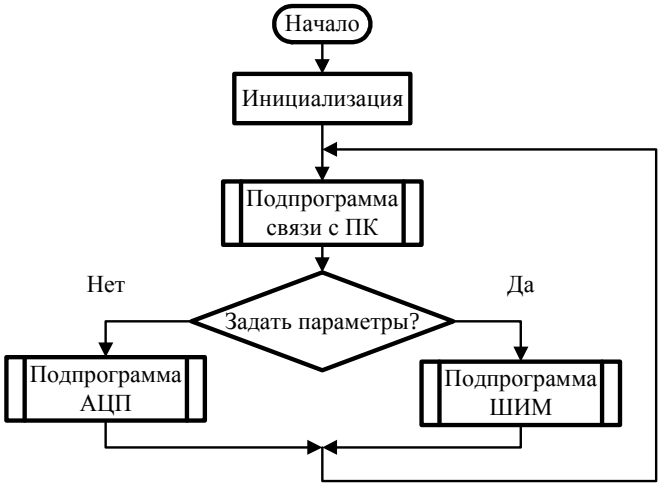


Рис. 6. Алгоритм программы микроконтроллера

Выводы

1. Сформулированы основные требования к характеристикам и параметрам потенциостатов, а также приведены схемы работы в различных режимах при исследовании электрохимической коррозии.

2. Предложен подход к построению формирующего узла, базирующийся на использовании реверсивного широтно-импульсного преобразователя с цифровым квазиоптимальным регулятором.

3. Предложены функциональные схемы потенциостатов нового поколения, опирающихся преимущественно на цифровую элементную базу и программируемую логику, а также даны рекомендации по построению отдельных узлов.

4. Показано, что важнейшей составляющей трудоемкости проектирования предложенных структур является две составляющих прикладного программного обеспечения – хост-программа для персонального компьютера и резидентная программа для встроенного микроконтроллера. Наведены примеры реализованных алгоритмов.

Список использованных источников

1. Інгібіторний захист обладнання харчової промисловості / О. І. Сиза, О. М. Савченко, Ю. В.Квашук, С. В. Гаценко // Вісник Черніг. держ. технол. ун-ту. – 2011. – №1 (47). – С. 220-224.

2. Особливості впливу стаціонарних електричних полів на корозійне руйнування металів / О. Сиза, В. Старчак, О. Вервейко [та ін.] // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2010. – №8. – С. 84-87.

3. Дамаскин Б. Б. Практикум по электрохимии / Б. Б. Дамаскин, О. А. Петрий, Б. И. Подловченко [и др.]; под ред. Б. Б. Дамаскина. – М.: Высш. шк., 1991. – 288 с.

4. Потенциостат П-5848. Техническое описание и инструкция по эксплуатации.

5. Войтенко В. П. Застосування штучних нейронних мереж для ідентифікації промислових об'єктів керування / В. П. Войтенко, М. А. Хоменко, П. В. Рудіч // Вісник ЧДТУ. – Чернігів: ЧДТУ, 2011. – № 1 (47). – С. 196-201.

6. Войтенко В. П. Нейроидентификация в промышленных регуляторах / В. П. Войтенко, М. А. Хоменко // Технічна електродинаміка. – 2008. – С. 60-61. – (Тем. вип. “Силова електроніка та енергоефективність”, ч. 2).

7. Войтенко В. П. Квазиоптимальные промышленные регуляторы с автоматической параметрической идентификацией / Войтенко В. П. // Технічна електродинаміка. – 2004. – С. 85-90. – (Тем. вип. “Силова електроніка та енергоефективність”, ч. 3).

УДК 621.391

С.В. Зайцев, канд. техн. наук
Чернігівський державний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

АНАЛІЗ ПРОПУСКНОЇ СПРОМОЖНОСТІ КАНАЛУ ЗВ’ЯЗКУ З НАВМИСНИМИ ЗАВАДАМИ ТА СИГНАЛАМИ OFDM

Проводиться аналіз впливу навмисних завад типу білий гаусівський шум на системи зв’язку з сигналами, які побудовані на основі технології OFDM. Отримані нові аналітичні залежності для розрахунку пропускної спроможності телекомунікаційних радіосистем з технологією OFDM, що враховують спектральні характеристики та щільності розподілу ймовірностей квадратурних складових завад.

Вступ

Перспективним напрямком розвитку відомчих телекомунікаційних радіосистем є впровадження програмованих радіостанцій (SDR-software defined radio), принцип побудови яких заснований на апаратно-програмній реалізації. Програмовані радіостанції наступних поколінь будуть застосовувати декілька режимів роботи: робота з сучасними транкінговими радіозасобами, КХ/УКХ радіостанціями та мобільними радіозасобами покоління 3G та 4G. Одним з режимів є режим роботи в умовах впливу навмисних завад, тобто завад, які створюються станціями радіоелектронної протидії.

В якості модуляції сигналу застосовуються спектрально-ефективні методи ФМ-*M* (*M*-PSK), КАМ-*M* (QAM-*M*), які дозволяють ефективно використовувати пропускну спроможність каналу зв’язку [1; 2]. Крім того, ефективним напрямком підвищення

пропускної спроможності та завадозахищеності каналів є застосування технології ортогонально-частотного мультиплексування OFDM (Orthogonal frequency-division multiplexing). При використанні в програмованій радіостанції (ПРС) демодулятора з "м'яким" виходом на етапі проектування використовуються моделі дискретно-неперервного каналу зв'язку [3; 4].

Аналіз досліджень і публікацій

Розрахувати пропускну спроможність каналу зв'язку з використанням класичних аналітичних залежностей неможливо, тому що ці вирази отримані для умов передачі інформації в умовах впливу тільки флуктуаційного шуму [5]. Аналізу пропускної спроможності каналу зв'язку в умовах впливу флуктуаційного шуму та навмисних завад від однієї станції радіоелектронної протидії присвячені роботи деяких учених [5-7]. Виникає завдання аналізу пропускної спроможності каналу зв'язку в умовах впливу флуктуаційного шуму та навмисних завад від декількох станцій радіоелектронної протидії для радіостанції з технологією OFDM.

Постановка завдання

Метою статті є отримання аналітичних залежностей для розрахунку пропускної спроможності дискретно-неперервного каналу зв'язку в умовах впливу флуктуаційного шуму та навмисних завад від декількох станцій радіоелектронної протидії для радіостанцій, які використовують технологію OFDM.

Виклад основного матеріалу

Основна ідея методу OFDM полягає в тому, що смуга пропускання каналу розбивається на групу вузьких смуг (субканалів), кожна зі своєю піднесучою. На всіх піднесучих сигнал передається одночасно, що дозволяє забезпечити велику швидкість передачі інформації при невеликій швидкості передачі в кожному окремому субканалі [8; 9]. Сигнал OFDM складається із N ортогональних піднесучих, модульованих N паралельними потоками даних.

Формування підканалів з ортогональними піднесучими відбувається за допомогою процедури зворотного дискретного перетворення Фур'є (ДПФ). На практиці процедури зворотного ДПФ (на передаючій стороні) та прямого ДПФ (на прийомній) реалізуються за допомогою алгоритму швидкого перетворення Фур'є (ШПФ) та виконуються процесором ШПФ [9].

Таким чином, функції OFDM-модулятора зводяться до формування складового неперервного сигналу, який містить N піднесучих, більша частина з яких модульовані інформаційними символами на інтервалі T_S [9]:

$$x(t) = \sum_{k=1}^{N} a_k \cos\left(2\pi f_k t - \varphi_k\right) = \sum_{k=0}^{N} \mathrm{Re}\left(\dot{a}_k e^{j2\pi f_k t}\right), \quad (1)$$

де $\dot{a}_k = a_k e^{j\varphi_k}$ – комплексний модулюючий символ (ФМ-M або КАМ-M), T_S – тривалість символу, a_k – амплітуда символу, φ_k – фаза символу, $k = \overline{1, N}$.

Реалізація функцій OFDM-модулятора на базі цифрового процесора ШПФ передбачає перехід від безперервного часу до дискретного ($t = nT$), при цьому вираз (1), з урахуванням періоду дискретизації $T = T_S / N$, набуде вигляду [9]:

$$X_n = X(nT) = \sum_{k=0}^{N-1} \mathrm{Re}\left(\dot{a}_k e^{j2\pi kn\frac{T}{T_S}}\right) = \sum_{k=0}^{N-1} \mathrm{Re}\left(\dot{a}_k e^{jkn\frac{2\pi}{N}}\right). \quad (2)$$

Вираз (2) являє собою дійсну частину зворотного ДПФ набору паралельно переданих символів $\dot{a}_k$.

При демодуляції приймальний пристрій з прийнятого сигналу видобуває часові відліки $\dot{X}(nT)$ і, застосовуючи до них процедуру ШПФ, формує оцінки переданих інформаційних символів [9]:

$$\dot{a}_k^{/} = \sum_{n=0}^{N-1} \dot{X}(nT) e^{-jkn\frac{2\pi}{N}}.$$

Структурна схема формування сигналів OFDM, вплив флуктуаційного шуму, навмисних завад та демодуляція сигналів OFDM показана на рис. 1. Пунктирною лінією виділений дискретно-неперервний канал. Кожен субканал модулятора сигналів OFDM, показаний на рис. 1, має вигляд, як на рис. 2. Субканал демодулятора сигналів OFDM показаний на рис. 3.

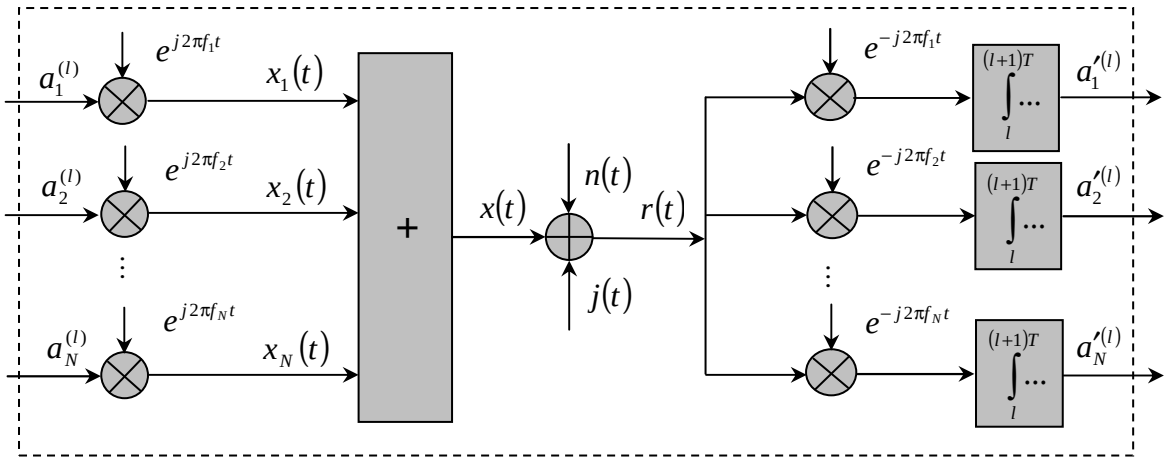


Рис. 1. Структурна схема дискретно-неперервного каналу з OFDM

Набір сигналів $\{x_k(t)\}$, $k = \overline{1, N}$ виражається лінійною комбінацією N ортогональних сигналів $\psi_{k1}(t), \psi_{k2}(t), \ldots, \psi_{kN}(t)$ [7]:

$$x_k(t) = \sum_{n=1}^{N} x_{kn} \psi_{kn}(t),\ k = \overline{1, N},$$

де x_{kn} – коефіцієнти при $\psi_{kn}(t)$ розкладання сигналів по базисних функціях (коефіцієнт ортонормованого розкладання або проекція сигналів $\{x_k(t)\}$, на базиси $\psi_{kn}(t)$).

При передачі цифрової інформації за допомогою модуляції ФМ-*M* радіоімпульси на виході модулятора мають однакову амплітуду та частоту, і відрізняються лише початковими фазами.

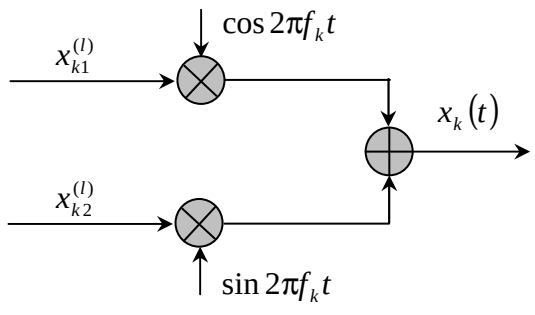


Рис. 2. Субканал OFDM-модулятора

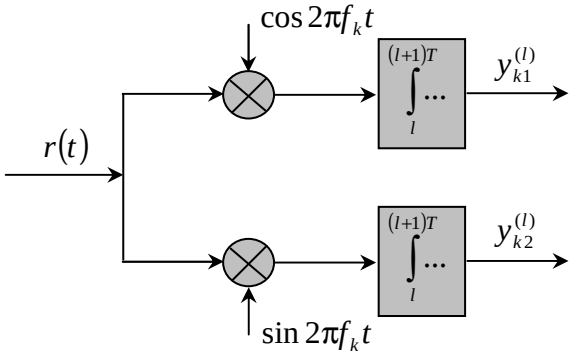


Рис. 3. Субканал OFDM-демодулятора

Для когерентних M-позиційних схем ФМ сигнал $x_k(t) = \mathrm{Re}\left(\dot{a}_k e^{j2\pi f_k t}\right) = \sqrt{2E_s/T}\cos(\omega_k t - \varphi_k) = \sqrt{2E_s/T}\cos(\omega_k t - 2\pi m/M)$, $0 \le t \le T$, E_s – енергія сигналу, ω_k – несучі частоти, T – час передачі символу, $m = \overline{1, M}$, M – розмірність сигнального простору [7].

Припускаючи простір ортонормованим, представимо сигнали $x_k(t)$, $k = \overline{1, N}$ M-позиційної ФМ у вигляді:

$$x_k(t) = x_{k1}\psi_{k1}(t) + x_{k2}\psi_{k2}(t) = \sqrt{E_s}\cos(2\pi m/M)\psi_{k1}(t) + \sqrt{E_s}\sin(2\pi m/M)\psi_{k2}(t),$$

$$\psi_{k1}(t) = \sqrt{2/T}\cos\omega_k t, \qquad \psi_{k2}(t) = \sqrt{2/T}\sin\omega_k t, \qquad x_{k1} = \sqrt{E_s}\cos(2\pi m/M),$$

$x_{k2} = \sqrt{E_s}\sin(2\pi m/M)$ є коефіцієнтами ортонормованого розкладання сигналів $\{x_{km}(t)\}$ у двовимірному евклідовому просторі.

Зі способу синтезу сигналів $\{x_k(t)\}$ з відповідних коефіцієнтів $\{x_{kn}\}$ походить і спосіб відновлення векторів за сигналами (передбачається, що сигнали $x_k(t)$, $k = \overline{1, N}$ завадами не спотворюються).

$$\int_0^T x_k(t)\psi_{kl}(t)dt = \int_0^T \left[\sum_{n=1}^{\mathrm{N}} x_{kn}\psi_{kn}(t)\right]\psi_{kl}(t)dt = \sum_{n=1}^{\mathrm{N}} x_{kn}\int_0^T \psi_{kn}(t)\psi_{kl}(t)dt = \sum_{n=1}^{\mathrm{N}} x_{kn}\delta_{knl} = x_{kn},$$

де символ Кронекера $\delta_{nl} = \begin{cases} 1, & n = l, \\ 0, & n \ne l. \end{cases}$

Виконуючи множення та інтегрування для кожної з функції $\psi_{kl}(t)$, $1 \le l \le \mathrm{N}$, отримуємо $\vec{x}_k = (x_{k1}, x_{k2}, \ldots, x_{k\mathrm{N}})$.

В N-вимірному евклідовому просторі коефіцієнти сигналу OFDM можна представити як:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \ldots & x_{1\mathrm{N}} \\ x_{21} & x_{22} & \ldots & x_{2\mathrm{N}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{N1} & x_{N2} & \ldots & x_{N\mathrm{N}} \end{bmatrix}.$$

Відповідно в двовимірному просторі:

$$\mathbf{X}^T = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{21} & \ldots & x_{N1} \\ x_{12} & x_{22} & \ldots & x_{N2} \end{bmatrix}.$$

У каналі зв'язку переданий OFDM-сигнал $x(t)$ спотворюється мультиплікативними та адитивними завадами. Мультиплікативні завади представляються матрицею передачі каналу $\mathbf{H}$. В роботі передбачається, що всі елементи матриці $\mathbf{H}$ дорівнюють одиниці. В якості адитивних завад розглядаються флуктуаційний шум $n(t)$ та завади $j(t)$.

Флуктуаційний шум $n(t)$ математично можна представити як випадковий процес: $n(t) = N(t)\cos(\omega_k t - \varphi_k) = N(t)\cos\varphi_k\cos\omega_k + N(t)\sin\varphi_k\sin\omega_k$, де $N(t)\cos\varphi_k$ та $N(t)\sin\varphi_k$ – гаусівські нормально розподілені випадкові величини. Шум $n_k(t)$, який присутній в k-му субканалі OFDM-демодулятора, можна виразити як лінійну комбінацію N ортогональних сигналів $\psi_{k1}(t), \psi_{k2}(t), \ldots, \psi_{k\mathrm{N}}(t)$

$$n_k(t) = \sum_{n=1}^{\mathrm{N}} n_{kn}\psi_{kn}(t), \; k = \overline{1, N}.$$

Для двовимірного простору $n_k(t) = n_{k1}\psi_{k1}(t) + n_{k2}\psi_{k2}(t)$, $k = \overline{1, N}$.

Таким чином, сигнал $n_k(t)$ можна представити у вигляді вектора $\vec{n}_k = (n_{k1}, n_{k2}, \ldots, n_{k\mathrm{N}})$ або в матричному вигляді $\mathbf{N}_k = [n_{k1} \quad n_{k2} \quad \ldots \quad n_{k\mathrm{N}}]$.

В N-вимірному евклідовому просторі для кожного субканалу OFDM-демодулятора коефіцієнти процесу шуму будуть мати наступний вигляд:

$$\mathbf{N} = \begin{bmatrix} n_{11} & n_{12} & \ldots & n_{1\mathrm{N}} \\ n_{21} & n_{22} & \ldots & n_{2\mathrm{N}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ n_{N1} & n_{N2} & \ldots & n_{N\mathrm{N}} \end{bmatrix}.$$

Відповідно в двовимірному просторі:

$$\mathbf{N}^T = \begin{bmatrix} n_{11} & n_{21} & \ldots & n_{N1} \\ n_{12} & n_{22} & \ldots & n_{N2} \end{bmatrix}.$$

Аналогічно флуктуаційному шуму навмисні завади математично можна записати теж як випадковий процес: $j(t) = J(t)\cos(\omega_k t - \varphi_k) = J(t)\cos\varphi_k \cos\omega_k + J(t)\sin\varphi_k \sin\omega_k$, де $J(t)\cos\varphi_k$ та $J(t)\sin\varphi_k$ – гаусівські нормально розподілені випадкові величини. Заваду $j_k(t)$, яка присутня в *k*-му субканалі OFDM-демодулятора, можна виразити як лінійну комбінацію *N* ортогональних сигналів $\psi_{k1}(t), \psi_{k2}(t), \ldots, \psi_{k\mathrm{N}}(t)$:

$$j_k(t) = \sum_{n=1}^{\mathrm{N}} j_{kn}\psi_{kn}(t), \; k = \overline{1, N}.$$

Для двовимірного простору

$$j_k(t) = j_{k1}\psi_{k1}(t) + j_{k2}\psi_{k2}(t), \; k = \overline{1, N}.$$

В N-вимірному евклідовому просторі для кожного субканалу OFDM-демодулятора коефіцієнти процесу навмисної завади будуть представлені як:

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} j_{11} & j_{12} & \cdots & j_{1\mathrm{N}} \\ j_{21} & j_{22} & \cdots & j_{2\mathrm{N}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ j_{N1} & j_{N2} & \cdots & j_{N\mathrm{N}} \end{bmatrix}.$$

На вхід модулятора сигналів OFDM поступають *M*-рівневі відліки синфазної та квадратурної складової сигналів ФМ-*M* або КАМ-*M*. У зв'язку з тим, що в каналі зв'язку відбувається додавання до синфазної та квадратурної складової сигналів випадкових синфазних і квадратурних складових шуму та завади, розподілених за нормальним законом (рівні відліків шуму та завади приймають значення від $-\infty$ до $+\infty$), то сигнали, які з'являються на виході субканалів OFDM-демодулятора, є випадковими величинами, які розподілені теж за нормальним законом і приймають значення від $-\infty$ до $+\infty$.

Виділений на рис. 1 дискретно-неперервний канал може бути замінений векторною моделлю (рис. 4).

Проаналізуємо пропускну спроможність цього каналу при впливі флуктуаційного шуму разом із шумовою загороджувальною завадою (ШЗЗ), шумовою завадою в частині смуги (ШЗЧС) та завадою у відповідь (ЗВ). Моделі цих завад можна знайти в [6].

Коефіцієнти шумового процесу $\{n_{kn}\}$, $k = \overline{1, N}$, $n = \overline{1, \mathrm{N}}$ є гаусівськими випадковими величинами з нульовим математичним очікуванням і дисперсіями $G_{k0}/2$, $k = \overline{1, N}$ відповідно.

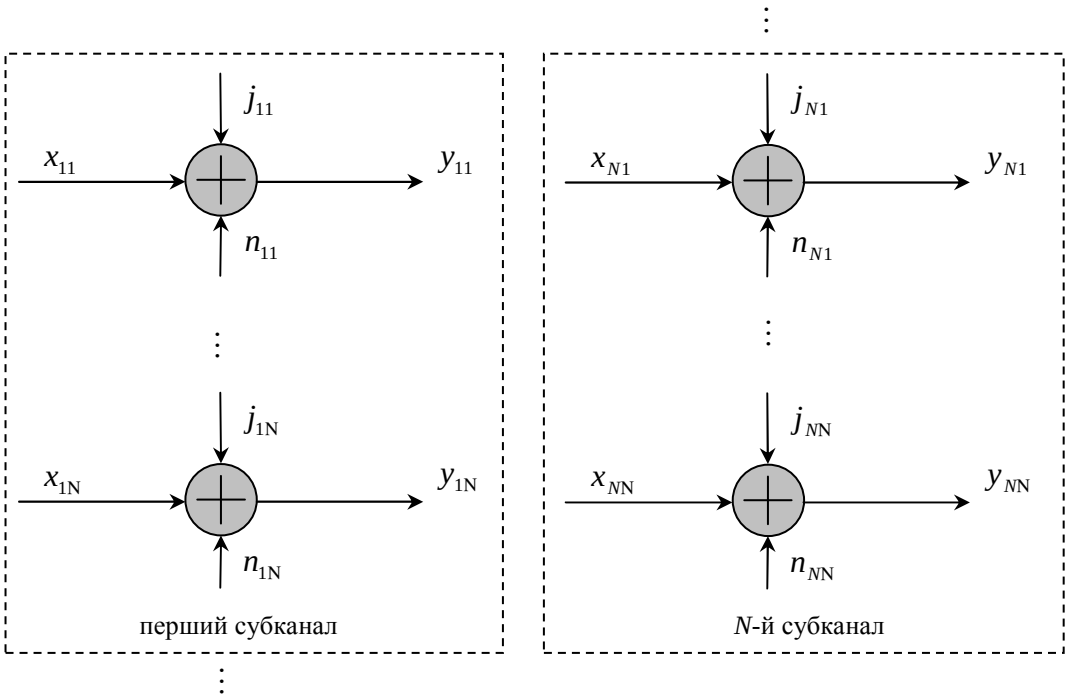


Рис. 4. Структурна схема спрощеної моделі дискретно-неперервного каналу з OFDM

Функції щільності розподілу ймовірності кожного коефіцієнта мають вигляд [8]:

$$w_k(n_{kn}) = \xi_k\left(0, \frac{G_{k0}}{2}\right) = \frac{1}{\sqrt{\pi G_{k0}}} \exp\left(-\frac{(n_{kn})^2}{G_{k0}}\right).$$

Коефіцієнти процесу навмисної завади $\{j_{kn}\}$, $k = \overline{1, N}$, $n = \overline{1, \mathrm{N}}$ також є гаусівськими випадковими величинами з нульовим математичним очікуванням і дисперсіями $G_{kj}/2$, $k = \overline{1, N}$ відповідно.

Для навмисних завад функції щільності розподілу ймовірності кожного коефіцієнта дорівнюють:

$$w_k(j_{kn}) = \eta_k\left(0, \frac{G_{kj}}{2}\right) = \frac{1}{\sqrt{\pi G_{kj}}} \exp\left(-\frac{(j_{kn})^2}{G_{kj}}\right).$$

На цьому рисунку $\{x_{kn}\}$ приймають дискретні значення, $\{y_{kn}\}$ – неперервні. Розглянемо *k*-й субканал. Пропускна спроможність *k*-го дискретно-неперервного каналу зв'язку, розрахована на один вхідний символ, визначається як максимум кількості інформації, переданої по каналу, по всіх можливих розподілах вхідного сигналу x_m, $m = 1,2,\ldots,M$ [7]:

$$C_k = \max_{p(\vec{x}_{k1}),\ldots,p(\vec{x}_{kM})} J_k(\vec{x}_{km}, \vec{y}_k).$$

Пропускна спроможність дискретно-наперервного каналу зв'язку з повним OFDM-сигналом буде мати вигляд:

$$C = \sum_{k=1}^{N} C_k . \qquad (4)$$

У виразі (3) $J_k(\vec{x}_{km}, \vec{y}_k) = H_k(\vec{x}_{km}) - H_k(\vec{x}_{km}/\vec{y}_k)$ ентропія вхідного сигналу $H_k(\vec{x}_{km}) = -\sum_{m=1}^{M} p(\vec{x}_{km}) \log_2 p(\vec{x}_{km})$, а умовна ентропія

$H_k\left(\vec{x}_{km}/\vec{y}_k\right)=-\sum_{m=1}^{M} p\left(\vec{x}_{km}\right)\int_{-\infty}^{\infty} w_k\left(\vec{y}_k/\vec{x}_{km}\right)\log_2\frac{p\left(\vec{x}_{km}\right)w_k\left(\vec{y}_k/\vec{x}_{km}\right)}{w_k\left(\vec{y}_k\right)}$. Підставивши вирази для $H_k\left(\vec{x}_{km}\right)$ та $H_k\left(\vec{x}_{km}/\vec{y}_k\right)$ в (3), а також зважаючи на те, що використовуються N-вимірні вектори, одержимо відповідно

$$C_k=\max_{p\left(\vec{x}_{k1}\right),\ldots,p\left(\vec{x}_{kM}\right)}\sum_{m=1}^{M}\int_{-\infty}^{\infty}\cdots\int_{-\infty}^{\infty}_{\mathrm{N}} w_k\left(y_{k1},\ldots,y_{k\mathrm{N}}/x_{km1},\ldots,x_{km\mathrm{N}}\right)p\left(x_{km1},\ldots,x_{km\mathrm{N}}\right)\times$$

$$\times\log_2\left[\frac{w_k\left(y_{k1},\ldots,y_{k\mathrm{N}}/x_{km1},\ldots,x_{km\mathrm{N}}\right)}{w_k\left(y_{k1},\ldots,y_{k\mathrm{N}}\right)}\right]dy_{k1}\ldots y_{k\mathrm{N}} \qquad (5)$$

Запишемо вирази для C_k у більш спрощеній формі:

$$C_k=\max_{p\left(\vec{x}_{k1}\right),\ldots,p\left(\vec{x}_{kM}\right)}\sum_{m=1}^{M}\int_{-\infty}^{\infty}\cdots\int_{-\infty}^{\infty}_{\mathrm{N}} w_k\left(\vec{y}_k/\vec{x}_{km}\right)p\left(\vec{x}_{km}\right)\log_2\left[\frac{w_k\left(\vec{y}_k/\vec{x}_{km}\right)}{w_k\left(\vec{y}_k\right)}\right]d\vec{y}_k. \qquad (6)$$

Використовуючи перетворення [7]

$$w_k\left(\vec{y}_k\right)=\sum_{i=1}^{M} w_k\left(\vec{y}_k/\vec{x}_{ki}\right)p\left(\vec{x}_{ki}\right),$$

запишемо (6) у наступному вигляді:

$$C_k=\max_{p\left(\vec{x}_{k1}\right),\ldots,p\left(\vec{x}_{kM}\right)}\sum_{m=1}^{M}\int_{-\infty}^{\infty}\cdots\int_{-\infty}^{\infty}_{\mathrm{N}} w_k\left(\vec{y}_k/\vec{x}_{km}\right)p\left(\vec{x}_{km}\right)\log_2\left[\frac{w_k\left(\vec{y}_k/\vec{x}_{km}\right)}{\sum_{i=1}^{M} w_k\left(\vec{y}_k/\vec{x}_{ki}\right)p\left(\vec{x}_{ki}\right)}\right]d\vec{y}_k=$$

$$=\max_{p\left(\vec{x}_{k1}\right),\ldots,p\left(\vec{x}_{kM}\right)}\sum_{m=1}^{M}\int_{-\infty}^{\infty}\cdots\int_{-\infty}^{\infty}_{\mathrm{N}} w_k\left(\vec{y}_k/\vec{x}_{km}\right)p\left(\vec{x}_{km}\right)\log_2 w_k\left(\vec{y}_k/\vec{x}_{km}\right)d\vec{y}_k-$$

$$-\max_{p\left(\vec{x}_{k1}\right),\ldots,p\left(\vec{x}_{kM}\right)}\sum_{m=1}^{M}\int_{-\infty}^{\infty}\cdots\int_{-\infty}^{\infty}_{\mathrm{N}} w_k\left(\vec{y}_k/\vec{x}_{km}\right)p\left(\vec{x}_{km}\right)\log_2\sum_{i=1}^{M} w_k\left(\vec{y}_k/\vec{x}_{ki}\right)p\left(\vec{x}_{ki}\right)d\vec{y}_k=I_{k1}-I_{k2}. \qquad (7)$$

Передбачається, що символи x_{km}, $m=1,\ldots,M$, які надходять на вхід каналу, рівноймовірні, тоді:

$$p\left(\vec{x}_{km}\right)=\frac{1}{M},\ m=1,\ldots,M. \qquad (8)$$

Для каналу з адитивним білим гаусівським шумом (дисперсія $\sigma_{kn}^2=G_{k0}/2$) функція умовної щільності розподілу ймовірностей величини $\vec{y}_k$ за умови, що передавалася величина $\vec{x}_{km}$, визначається [7]:

$$w_k\left(\vec{y}_k/\vec{x}_{km}\right)=\prod_{n=1}^{\mathrm{N}} w_k\left(y_{kn}/x_{kmn}\right)=\prod_{n=1}^{\mathrm{N}}\frac{1}{\sqrt{\pi G_{k0}}}\exp\left[\frac{-\left(y_{kn}-x_{kmn}\right)^2}{G_{k0}}\right]=$$

$$\frac{1}{\left(\sqrt{\pi G_{k0}}\right)^{\mathrm{N}}}\exp\sum_{n=1}^{\mathrm{N}}\left[\frac{-\left(y_{kn}-x_{kmn}\right)^2}{G_{k0}}\right]=\frac{1}{\left(\sqrt{\pi G_{k0}}\right)^{\mathrm{N}}}\exp\left[\frac{-\left|\vec{y}_k-\vec{x}_{km}\right|^2}{G_{k0}}\right], \qquad (9)$$

де $\sum_{n=1}^{\mathrm{N}}\left[\frac{-\left(y_{kn}-x_{kmn}\right)^2}{G_{k0}}\right]=\frac{-\left|\vec{y}_k-\vec{x}_{km}\right|^2}{G_{k0}}$.

З обліком (8) і (9) запишемо вираз для I_{k1} таким чином:

$$I_{k1} = \sum_{m=1}^{M} \int_{-\infty}^{\infty} \cdots \int_{-\infty}^{\infty} w_k\left(\vec{y}_k / \vec{x}_{km}\right) p\left(\vec{x}_{km}\right) \log_2 w_k\left(\vec{y}_k / \vec{x}_{km}\right) d\vec{y}_k =$$

$$= \frac{1}{M} \sum_{m=1}^{M} \int_{-\infty}^{\infty} \cdots \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\left(\sqrt{\pi G_{k0}}\right)^{\mathrm{N}}} \exp\left[\frac{-\left|\vec{y}_k - \vec{x}_{km}\right|^2}{G_{k0}}\right] \log_2 \frac{1}{\left(\sqrt{\pi G_{k0}}\right)^{\mathrm{N}}} \exp\left[\frac{-\left|\vec{y}_k - \vec{x}_{km}\right|^2}{G_{k0}}\right] d\vec{y}_k . \quad (10)$$

У результаті математичних перетворень отримаємо:

$$I_{k1} = -\frac{\mathrm{N}}{2} \log_2\left(\pi e G_{k0}\right),$$

$$I_{k2} = -\log_2(M) - \frac{\mathrm{N}}{2} \log_2\left(\pi e G_{k0}\right) +$$

$$+ \frac{1}{M\left(\sqrt{\pi}\right)^{\mathrm{N}}} \sum_{m=1}^{M} \int_{-\infty}^{\infty} \cdots \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\left|\vec{t}_k\right|^2\right) \log_2\left[\sum_{i=1}^{M} \exp\left[-2\vec{t}_k \vec{d}_{kmi} - \left|\vec{d}_{kmi}\right|^2\right]\right] d\vec{t}_k , \quad (11)$$

де $\vec{d}_{kmi} = \dfrac{\vec{x}_{km} - \vec{x}_{ki}}{\sqrt{G_{k0}}}$.

Підставивши (10), (11) в (7), одержимо формулу для розрахунку пропускної спроможності k-го дискретно-неперервного каналу зв'язку із урахуванням розмірності евклідового простору N і розмірності сигнального сузір'я M:

$$C_k = \log_2(M) - \frac{1}{M\left(\sqrt{\pi}\right)^{\mathrm{N}}} \sum_{m=1}^{M} \int_{-\infty}^{\infty} \cdots \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\left|\vec{t}_k\right|^2\right) \log_2\left[\sum_{i=1}^{M} \exp\left[-2\vec{t}_k \vec{d}_{kmi} - \left|\vec{d}_{kmi}\right|^2\right]\right] d\vec{t}_k , \quad (12)$$

де $\vec{d}_{kmi} = \dfrac{\vec{x}_{km} - \vec{x}_{ki}}{\sqrt{G_{k0}}}$.

При впливі ШЗЗ на полосу частот, яка відповідає k-му субканалу сигналу OFDM, дисперсія σ_k^2 будє мати вигляд: $\sigma_k^2 = \sigma_{kn}^2 + \sigma_{kj}^2 = \left(G_{k0} + G_{kj}\right)/2$, де σ_{kn}^2 – дисперсія флуктуаційного шуму, σ_{kj}^2 – дисперсія навмисної завади, G_{kj} – спектральна щільність потужності навмисної завади.

При впливі ШЗЧС на полосу частот, яка відповідає k-му субканалу сигналу OFDM, дисперсія буде визначатися як: $\sigma_k^2 = \sigma_{kn}^2 + \sigma_{kj}^2 = G_{k0}/2 + G_{kj}/2\gamma_k$.

У випадку застосування постановником завад ЗВ на полосу частот, яка відповідає k-му субканалу сигналу OFDM, дисперсія σ_k^2 буде визначатися як: $\sigma_k^2 = \sigma_{kn}^2 + \sigma_{kj}^2 = \left(G_{k0} + G_{kj}\right)/2$. Для всіх розглянутих випадків при відсутності навмисних завад дисперсія $\sigma_k^2 = \sigma_{kn}^2 = G_{k0}/2$.

Для k-го субканалу сигналу OFDM із флуктуаційним шумом і ШЗЗ, ШЗЧС, ЗВ функції умовної щільності розподілу ймовірності величин $\{y_{kn}\}$ за умови, що передавалися величини $\{x_{kn}\}$ і впливали навмисні завади $\{j_{kn}\}$ відповідно для кожного частотного субканалу сигналу OFDM, визначаються за аналогією з (9), відповідно як:

- при ШЗЗ

$$w_k\left(\vec{y}_{kj} / \vec{x}_{km}\right) = \frac{1}{\left(\sqrt{\pi\left(G_{k0} + G_{kj}\right)}\right)^{\mathrm{N}}} \exp\left[\frac{-\left|\vec{y}_{kj} - \vec{x}_{km}\right|^2}{G_{k0} + G_{kj}}\right]; \quad (13)$$

- при ШЗЧС

$$w_k\left(\vec{y}_{kj}/\vec{x}_{km}\right)=\frac{1}{\left(\sqrt{\pi\left(G_{k0}+\frac{G_{kj}}{\gamma_k}\right)}\right)^{\mathrm{N}}}\exp\left[\frac{-\left|\vec{y}_{kj}-\vec{x}_{km}\right|^2}{G_{k0}+\frac{G_{kj}}{\gamma_k}}\right]; \tag{14}$$

- при ЗВ

$$w_k\left(\vec{y}_{kj}/\vec{x}_{km}\right)=\frac{1}{\left(\sqrt{\pi\left(G_{k0}+G_{kj}\right)}\right)^{\mathrm{N}}}\exp\left[\frac{-\left|\vec{y}_{kj}-\vec{x}_{km}\right|^2}{G_{k0}+G_{kj}}\right]. \tag{15}$$

Підставивши (13)-(15) у формули для розрахунку I_{k1} та I_{k2} – (10) і (11), а також виконавши за аналогією всі показані вище операції, одержимо вирази для розрахунку пропускної спроможності для *k*-го дискретно-неперервного каналу для випадку обов'язкової присутності завади. Таким чином:

- для ШЗЗ

$$C_{ka}=\log_2(M)-\frac{1}{M\left(\sqrt{\pi}\right)^{\mathrm{N}}}\sum_{m=1}^{M}\int_{-\infty}^{\infty}\cdots\int_{-\infty}^{\infty}\exp\left(-\left|\vec{t}_k\right|^2\right)\times$$

$$\times\log_2\left[\sum_{i=1}^{M}\exp\left[-2\vec{t}_k\,\overrightarrow{d}_{ka\,mi}-\left|\overrightarrow{d}_{ka\,mi}\right|^2\right]\right]d\vec{t}_k, \tag{16}$$

де $\overrightarrow{d}_{ka\,mi}=\dfrac{\vec{x}_{km}-\vec{x}_{ki}}{\sqrt{G_{k0}+G_{kj}}}$;

- для ШЗЧС

$$C_{kb}=\log_2(M)-\frac{1}{M\left(\sqrt{\pi}\right)^{\mathrm{N}}}\sum_{m=1}^{M}\int_{-\infty}^{\infty}\cdots\int_{-\infty}^{\infty}\exp\left(-\left|\vec{t}_k\right|^2\right)\times$$

$$\times\log_2\left[\sum_{i=1}^{M}\exp\left[-2\vec{t}_k\,\overrightarrow{d}_{kb\,mi}-\left|\overrightarrow{d}_{kb\,mi}\right|^2\right]\right]d\vec{t}_k, \tag{17}$$

де $\overrightarrow{d}_{kb\,mi}=\dfrac{\vec{x}_{km}-\vec{x}_{ki}}{\sqrt{G_{k0}+\dfrac{G_{kj}}{\gamma_k}}}$;

- для ЗВ

$$C_{kc}=\log_2(M)-\frac{1}{M\left(\sqrt{\pi}\right)^{\mathrm{N}}}\sum_{m=1}^{M}\int_{-\infty}^{\infty}\cdots\int_{-\infty}^{\infty}\exp\left(-\left|\vec{t}_k\right|^2\right)\times$$

$$\times\log_2\left[\sum_{i=1}^{M}\exp\left[-2\vec{t}_k\,\overrightarrow{d}_{kc\,mi}-\left|\overrightarrow{d}_{kc\,mi}\right|^2\right]\right]d\vec{t}_k, \tag{18}$$

де $\overrightarrow{d}_{kc\,mi}=\dfrac{\vec{x}_{km}-\vec{x}_{ki}}{\sqrt{G_{k0}+G_{kj}}}$.

Стан ШЗЧС – це випадкова величина *z*, обумовлена як $P(z=1)=\gamma$, якщо завада присутня, і $P(z=0)=1-\gamma$, якщо завада відсутня. Аналогічно для ЗВ, її стан також є

випадковою величиною *q*, такий що $P(q=1)=\gamma$, якщо завада присутня, і $P(q=0)=1-\gamma$, якщо завада відсутня.

З урахуванням цього вирази для розрахунку пропускної спроможності *k*-го субканалу дискретно-неперервного каналу зв'язку при впливі навмисних завад приймуть вигляд:

- при ШЗЗ (випадок ШЗЧС з $\gamma=1$)

$$C_k = C_{ka}; \tag{19}$$

- при ШЗЧС

$$C_k = \gamma_k C_{kb} + (1-\gamma_k)C_k; \tag{20}$$

- при ЗВ

$$C_k = \gamma_k C_{kc} + (1-\gamma_k)C_k. \tag{21}$$

Для розрахунку пропускної спроможності дискретно-неперервного каналу з сигналами OFDM в умовах впливу завади від однієї станції радіоелектронної протидії на певні *k*-ті субканали необхідно підставити в (4) вирази $C_k = C_{ka}$ для відповідних *k*-х субканалів при впливі ШЗЗ, $C_k = \gamma_k C_{kb} + (1-\gamma_k)C_k$ для відповідних *k*-х субканалів при впливі ШЗЧС та $C_k = \gamma_k C_{kc} + (1-\gamma_k)C_k$ для відповідних *k*-х субканалів при впливі ЗВ. В умовах відсутності завад в (4) необхідно підставити вираз (12) для відповідних *k*-х субканалів, в яких відсутні завади.

Наприклад, на ПРС впливають п'ять станцій завад. Станції 1-4 випромінюють ШЗЧС. П'ята станція випромінює ШЗЗ. Перша станція завад впливає на першу полосу частот сигналу OFDM-16 (16 субканалів), яка відповідає першому субканалу з коефіцієнтом перекриття $\gamma_1^{(1)} = 0{,}9$. Друга станція завад – на полосу частот сигналу OFDM-16, яка відповідає другому субканалу з коефіцієнтом перекриття $\gamma_2^{(2)} = 0{,}8$. Третя станція завад – на полосу частот сигналу OFDM-16, яка відповідає третьому субканалу з коефіцієнтом перекриття $\gamma_3^{(3)} = 0{,}7$. Четверта станція завад – на полосу частот сигналу OFDM-16, яка відповідає четвертому субканалу з коефіцієнтом перекриття $\gamma_4^{(4)} = 0{,}5$. П'ята станція завад – на полосу частот сигналу OFDM-16, яка відповідає субканалам з тринадцятого по шістнадцятий з коефіцієнтом перекриття $\gamma_{13-16}^{(5)} = 1$. Загальна пропускна здатність каналу з сигналом OFDM-16 дорівнює:

$$C = \sum_{k=1}^{4} \gamma_k^{(k)} C_{kb} + (1-\gamma_k^{(k)})C_k + \sum_{k=5}^{12} C_k + \sum_{k=13}^{16} C_{ka}. \tag{22}$$

У субканалах 1-4 використовується модуляція ФМ-2, в субканалах 5-11 – ФМ-4, а в субканалах 12-16 – ФМ-8. На рис. 5 показана залежність пропускної спроможності дискретно-неперервного каналу зв'язку з сигналом OFDM-16 від відношення сигнал-шум в каналі h_0^2 (відношення енергії сигналу до спектральної щільності потужності шуму) (відношення сигнал-завада дорівнює 0 дБ).

Перша характеристика розрахована за формулою (22), тобто відповідає випадку впливу навмисних завад та флуктуаційного шуму на канал з сигналом OFDM-16. Друга характеристика відповідає впливу тільки флуктуаційного шуму на канал з сигналом OFDM-16 та розрахована за формулами (4), (12). Третя залежність – випадку впливу на канал з сигналом ФМ-2 флуктуаційного шуму, розрахована за формулою (12).

Аналіз свідчить, що застосування навмисних завад істотно знижує пропускну спроможність каналів зв'язку з сигналами OFDM.

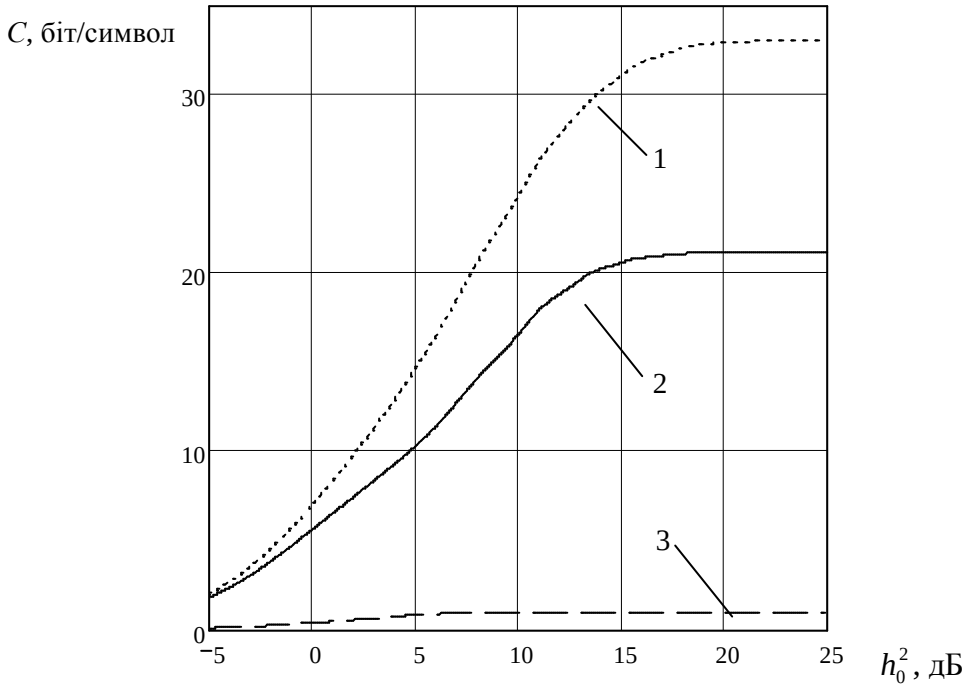


Рис. 5. Залежність пропускної спроможності каналу з сигналом OFDM-16 від відношення сигнал-завада при впливі ШЗЧС

Висновки

1. У роботі отримані нові аналітичні залежності, які дозволяють розраховувати пропускну спроможність каналу зв'язку з сигналами OFDM з урахуванням спектральних характеристик та щільності розподілу ймовірностей квадратурних складових флуктуаційного шуму та навмисних завад.

2. Проведений аналіз показав, що застосування OFDM-сигналів замість ФМ дозволить суттєво підвищити пропускну спроможність каналів в умовах впливу навмисних завад.

3. Напрямком подальших досліджень є аналіз впливу навмисних завад на пропускну спроможність програмованих радіостанцій та станцій систем 4G з технологією MIMO та OFDM.

Список використаних джерел

1. Зайцев С. В. Анализ принципов построения программируемых радиостанций / С. В. Зайцев, С. П. Ливенцев, А. И. Артюх // Зв'язок. – 2007. – № 5. – С. 46-54.

2. Зайцев С. В. Применение турбокодов в специальных телекоммуникационных системах / С. В. Зайцев, С. П. Ливенцев, Д. А. Алексеев // Правове, нормативне та метрологічне забезпечення систем захисту інформації в Україні. – 2005. – Вип. 11. – С. 162-167.

3. Пат. на корисну модель 33338, МПК H03M 13-37. Пристрій оптимізації процесу турбодекодування при низьких значеннях відношення сигнал-шум в каналі / О. І. Артюх, С. П. Лівенцев, С. В. Зайцев, О. В. Кувшинов, Б. В. Горлинський; заявл. 21.02.08; опубл. 25.06.08, Бюл. № 12.

4. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 17007 Україна. Имитационная модель системы радиосвязи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты, помехоустойчивым турбокодированием и функционирующая в условиях радиоэлектронного противодействия / С. Зайцев, С. Лівенцев, Б. Горлинський, А. Артюх; заявл. 19.04.2006 р.; опубл. 2006 р., Бюл. № 10.

5. McIllree P. Channel Capacity Calculations for M-ary N-dimensional Signal Sets: Thesis for the degree of Master of Engineering in Electronic Engineering / P. McIllree. – The University of South Australia, 1995. – P. 7-24.

6. Особенности декодера турбокода в программируемых радиостанциях при воздействии помех / С. П. Ливенцев, С. В. Зайцев, С.В. Кныр [и др.] // Зв'язок. – 2007. – № 2. – С. 31-35.

7. Зайцев С. В. Анализ пропускной способности дискретно-непрерывного канала связи для программируемых радиостанций с цифровыми методами модуляции сигнала при воздействии

організованных помех / С. В. Зайцев // Правове, нормативне та метрологічне забезпечення систем захисту інформації в Україні. – 2006. – № 2(13). – С. 27-32.

8. Hanzo L. MIMO-OFDM for LTE, WiFi and WiMax. Coherent versus Non-coherent and Cooperative Turbo-transceivers / L. Hanzo, Y. Akhtman, L. Wang. – John Wiley & Sons. – 2011. 658 p.

9. Dahlman E. 4G LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband / E. Dahlman, S. Parkvall, J. Skold. – Academic Pressis an imprint of Elsevier. – 2011. 431 p.

УДК 621.382

А.І. Сатюков, канд. фіз.-мат. наук
В.П. Журко, ст. викладач
Т.М. Тепла, асистент
М.О. Бивалькевич, ст. викладач
Чернігівський державний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

ВИКОРИСТАННЯ ВУЗЬКОЗОННИХ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ АНТИМОНІДУ ВІСМУТУ ДЛЯ ІНДИКАЦІЇ НВЧ

Наводяться результати досліджень по використанню контакту BiSbIn з металом для індикації НВЧ. Встановлена лінійність залежності вихідної напруги від поглиненої потужності. Отримана розрахункова залежність вольтватної чутливості від процентного вмісту In та зроблене порівняння її з експериментальними даними. Запропоноване пояснення розходження розрахункової та експериментальної залежностей.

Постановка проблеми

Розвиток НВЧ електронної техніки в останні роки потребує розширення гами різноманітних компонентів, що працюють у цьому діапазоні.

Одним з напрямів такого процесу є створення датчиків НВЧ потужності. При цьому слід відмітити, що для безперервного режиму НВЧ створені досить досконалі перетворювачі. За приклад можна назвати термістори і болометри. Вони повністю задовольняють потреби розробників відповідної вимірювальної техніки. Проте створення датчиків для вимірювань в імпульсному режимі і зараз є актуальною проблемою.

Аналіз досліджень і публікацій

До переліку існуючих перетворювачів імпульсної потужності НВЧ можна віднести тонкоплівочні болометри [4]. Принцип дії останніх не відрізняється від вказаних вище. Але за рахунок дуже малого об'єму речовини, що нагрівається, у таких приладів суттєво підвищується швидкодія. Існують датчики, які використовують у роботі термоелектричний ефект гарячих носіїв заряду в напівпровідниках. Вони здатні виділяти імпульси НВЧ з тривалістю менше за Імкс. До таких індикаторів відносяться діоди, що були описані в [1].

Спільною властивістю вищезгаданих приладів є те, що вони мають значення опору від десятків Ом до декількох кОм, що і визначає способи їх розміщення в НВЧ тракті.

Окремо в ряду існуючих датчиків НВЧ можна відмітити термоелектричні індикатори на основі напівметалу BiSb. Результати досліджувань їх властивостей та характеристик ретельно описані в [2]. У вказаних роботах описано і принцип дії таких приладів. Він полягає в тому, що поблизу контакту малої площі виникає градієнт температури і, як наслідок, термоелектрорушійна сила.

Вольтватні характеристики таких індикаторів розраховані шляхом розв'язання рівняння теплопровідності. Розрахункові значення вольтватної чутливості співпадають з експериментальними у межах 10-11 %.

У термоелектричних індикаторів є недолік. Значення їх опору не перевищують 15 Ом. Отримання більших величин потребує створення контактів дуже малих розмірів, а цей шлях призводить до звуження динамічного діапазону і зменшення надійності. Матеріалом для виготовлення термоелектричних індикаторів є монокристали BiSb. Оптимальними при

цьому виявились кристали, які вмістять від 5 % до 20 % сурми. Саме такий процентний склад має найбільше значення коефіцієнта Зеєбека – більш ніж 100 мкВ/град.

Мета статті

Метою цієї роботи є приведення результатів досліджень термоелектричних індикаторів потужності НВЧ, що виготовлені з монокристалів BiSbIn, та уточнити можливий механізм процесів у контакті метал-BiSbIn на НВЧ.

Виклад основного матеріалу

Для виготовлення індикаторів були використані монокристали BiSbIn з різним процентним вмістом In. Результати досліджень деяких електрофізичних властивостей таких матеріалів наведені в [3].

Вимірювання проводились в діапазоні 3 см. Зразки матеріалу BiSbIn монтувались у стандартних патронах НВЧ діодів, які розміщувались у детекторній секції. Для створення робочого контакту використовувався вольфрамовий дріт, що був електролітично загострений.

Вольтватні характеристики отриманих індикаторів по поглиненій потужності показані на рис. 1.

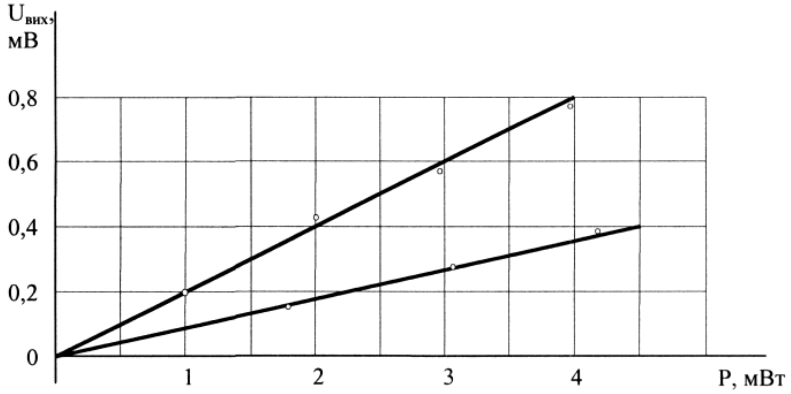


Рис. 1. Вольтватні характеристики індикаторів

Характеристики виявились лінійними, що співпадає з результатами досліджень подібних приладів, які виготовлялись з матеріалу BiSb.

У роботі [5], що присвячена дослідженням властивостей таких індикаторів, отримана формула для розрахунку вольтватної чутливості. За допомогою цього співвідношення була розрахована залежність чутливості досліджуваних зразків від процентного вмісту In. Значення коефіцієнта Зеєбека були визначені відповідно до результатів, що були отримані в [5] і показані на рис. 2.

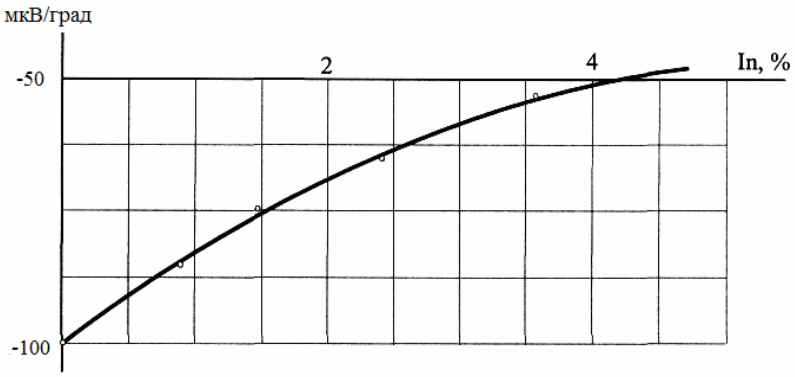


Рис. 2. Значення коефіцієнта Зеєбека

На рис. 3 показані результати таких розрахунків у порівнянні з експериментальними даними.

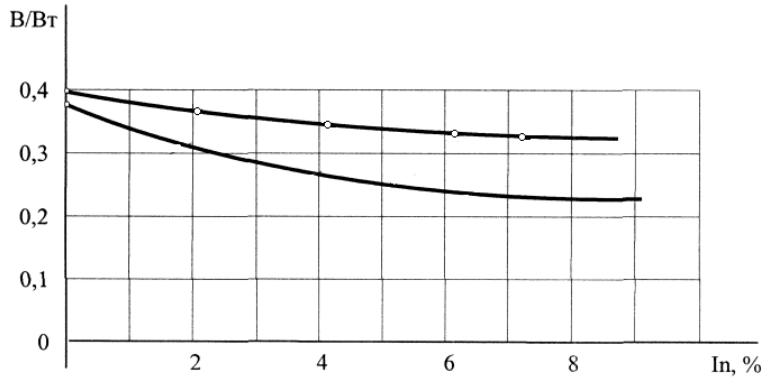


Рис. 3. Порівняння даних

Аналізуючи ці залежності, можна сказати, що для індикаторів, які виготовлені з матеріалу з малим вмістом In, спостерігається збіг розрахунків з експериментальними даними на рівні, що відповідає результатам [5]. Зі збільшенням вмісту In розходження між розрахунками і експериментальними даними стає більш суттєвим. При цьому слід відмітити, що це розходження не відповідає залежності, зображеній на рис. 2.

На нашу думку, причина такого розходження розрахунків з експериментальними даними може полягати в наступному:

Розрахунки чутливості індикаторів базуються на існуванні тільки одного процесу детектування НВЧ - звичайного термоелектричного ефекту. Для розуміння основного механізму процесу появи вихідного сигналу такий підхід повністю себе виправдовує.

Але матеріал BiSbIn є напівметалом. Характерною рисою напівметалів є поєднання властивостей металів і напівпровідників, що зумовлене специфічною будовою зонної структури. Поява атомів In починає змінювати розташування зон у цій структурі, причому в бік підсилення властивостей, характерних саме для напівпровідників (адже матеріал InSb є типовим вузькозонним напівпровідником). При цьому не виключено, що носії певного сорту утворять з металом контакт, який може мати випрямляючі властивості. В цьому випадку до вихідного сигналу, зумовленого термоелектричним ефектом, додається складова за рахунок процесів у такому контакті. Збільшення вмісту In робить цю складову більш вагомою, і як наслідок зростає розходження залежностей, що наведені на рис. 3.

Висновки

Проведені дослідження показали, що контакти металу з матеріалом BiSbln мають детектуючі властивості на НВЧ.

Вольтватні характеристики є лінійними.

Виявлено, що при збільшенні процентного складу In зростає розходження розрахунків вольтватної чутливості з експериментальними даними і запропоновано пояснення таких розбіжностей.

Список використаних джерел

1. А. с. №366617 СССР, МКИ G 01 R 29/01. Термопарный индикатор СВЧ-излучения / В. Т. Плаксий, В. М. Светличный // Открытия. Изобретения. – 1972. – № 4. – С.72.

2. Плаксий В. Т. Об инерционности точечно-контактных СВЧ-детекторов на основе сплава BiSb / В. Т. Плаксий, В. М. Светличный // Известия вузов СССР. Радиоэлектроника. – 1991. – Т. 14, № 5. – С. 588-589.

3. Светличный В. М. Детекторы СВЧ излучения / В. М. Светличный, В. Т. Плаксий, А. И. Сатюков. – Харьков: ХГУ, 1992. – 152с.

4. Richards P.L. Bolometer for infrared and millimeter waves / P.L. Richards // Journal of Applied Physics. 1994. Vol. 76. No.l. P. 1-24.

5. Вольт-ваттная чувствительность контакта металл-полуметалл с учетом теплового потока через границу контакта / В. Т. Плаксий, О. Н. Сухоручко, Б. О. Ефимов, А. П. Касьяненко // Вестник Сумского государственного университета. Серия "Физика, математика, механика". – 2001. – № 3(24)-4(25). – С. 132-136.

УДК 681.518.3:528.92

В.І. Зацерковний, канд. техн. наук
Чернігівський державний інститут економіки і управління, м. Чернігів, Україна

АНАЛІЗ СТАНУ ТОПОГРАФІЧНО-КАРТОГРАФІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯК ДЖЕРЕЛА ДАНИХ ДЛЯ ГІС ЧЕРНІГІВСЬКОЇ ОБЛАСТІ

Виконаний аналіз стану топографічно-картографічного забезпечення на рівні держави і для об'єкта дослідження (Чернігівської області). Відображений стан виробництва топографічних карт найбільш поширених масштабів, показані гістограми оновлення і зміни актуальності картографічного матеріалу за роками. Оцінена можливість використання картографічного фонду в якості джерела даних для ГІС Чернігівської області.

Постановка проблеми

За висновками корпорації RAND (американська дослідна організація), на нинішньому етапі людство сягнуло піку мультидисциплінарної революції. За прогнозами, ця революція триватиме щонайменше 15 років, стимулюючи широку інформатизацію усіх сфер життєдіяльності людини та зумовлюючи кардинальні зміни (підвищення загального рівня економічного розвитку, розбудову інфраструктури розподілу світових ресурсів; поліпшення показників якості довкілля; зростання військової могутності окремих країн і блоків). Успіх чи відставання за ключовими напрямами науково-технологічної сфери вже найближчим часом визначатиме економічну та соціальну культурну продуктивність кожної держави на світовій арені.

Звіт Всесвітнього економічного форуму щодо глобальної конкурентоспроможності окремих країн у 2006-2007 рр. довів, що провідні місця впевнено посідають технологічно розвинуті країни. До таких насамперед належать ті, що випереджальними темпами розвивають геоінформаційні технології (ГІТ) і технології дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) чи ефективно використовують їхню продукцію. ГІС у процесі свого функціонування оперують різними упорядкованими наборами даних. Серед них традиційно розрізняють картографічні, статистичні, аерокосмічні матеріали, які попередньо перетворюються і вводяться у середовище ГІС і/або отримуються з інших ГІС. Крім зазначених матеріалів, іноді використовуються дані спеціально проведених польових досліджень і зйомок, а також літературні (текстові) джерела [1; 2].

Використання географічних карт як джерел вихідних даних для формування баз даних зручне й ефективне за низкою причин. По-перше, атрибутивні характеристики, отримані з картографічних джерел, мають територіальну прив'язку; по-друге, у них відсутні «білі плями» в межах зображуваного простору (території, акваторії тощо); по-третє, існує багато інформаційних технологій переведення цих матеріалів у цифрову форму, тобто у форму, придатну для безпосереднього використання у ГІС; по-четверте, – це найдешевший і найдоступніший засіб створення галузевих тематичних карт за допомогою ГІС [2].

Однак для того, щоб можна було використовувати картографічні зображення, як джерело даних для ГІС, вони повинні мати відповідні масштаби й бути актуальними. Саме тому однією з актуальних задач при створенні ГІС є проведення аналізу існуючого картографічного забезпечення нашої держави й окремих її регіонів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Аналіз відповідності топографічних планів і карт сучасному стану місцевості наведено у працях Карпінського Ю.О., Лященко А.А., Катренко І.М., Лепетюка Б.Д., Трюхан М.О., Шевчука П.М. та інших. В їхніх дослідженнях підкреслена особлива роль топографо-картографічного забезпечення як складової успішного створення ГІС. Завдяки цим дослідженням значно прискорилися процеси з формування національної інфраструктури просторових даних.

Постановка завдання

Перед створенням регіональної ГІС Чернігівської області необхідно оцінити можливості забезпечення її просторовими й атрибутивними даними, перед усім топографо-

картографічними, а на підставі цього аналізу обґрунтувати шляхи наповнення баз даних регіональної ГІС.

Виклад основного матеріалу дослідження

Вигляд територій, особливо в регіонах, змінюється дуже швидко. З'являються нові квартали, будинки, поселення, дороги, парки, об'єкти інфраструктури тощо. Ці зміни повинні постійно фіксуватися і своєчасно відображуватись на картах регіонального геофонду (рис.1).

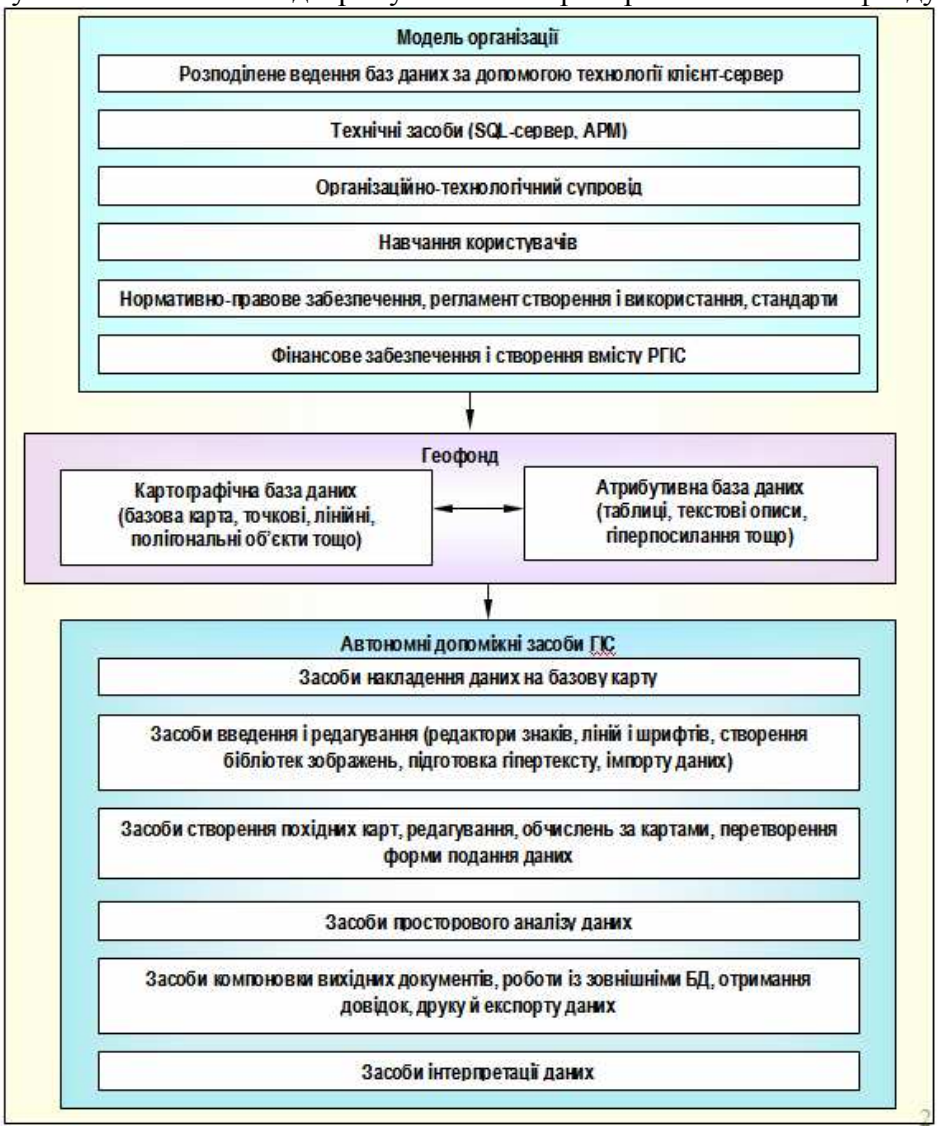


Рис.1. Структура організації регіональної геоінформаційної системи

Першою особливістю створюваних цифрових карт об'єктів і суб'єктів регіонів є їх розмір; повинні бути зведені і зшиті десятки, сотні або навіть тисячі номенклатурних аркушів карт (планів). Це породжує протиріччя між прагненням вибрати найбільший масштаб вихідних картоматеріалів і обсягом робіт з цифрового картографування. При збільшенні масштабу карт (планів) їх сумарна площа зростає у квадратичній залежності і відповідно збільшуються вартість і терміни виконання робіт. У той же час, чим більше масштаб, тим вище повнота вмісту, детальність і точність створюваної цифрової карти.

Ця суперечність обтяжується двома факторами. По-перше, при переході до найбільших масштабів знижується кондиційність усієї сукупності вихідних картоматеріалів, яка проявляється у неповноті охоплення території і в різночасності аркушів карт і планів. По-друге, при візуалізації електронних карт і при документуванні комп'ютерних

карт на «твердому» носії у дрібних масштабах необхідне багатомасштабне подання даних, оскільки діапазон зміни масштабів від вихідного до оглядового, який забезпечує охоплення усієї території, змінюється у декілька сотень або тисяч разів. Перший фактор з неминучістю приводить до необхідності використання різномасштабних і різночасових вихідних картоматеріалів на різних ділянках території й наступного доведення цифрової карти до актуального стану і необхідних повноти вмісту, детальності і точності. Облік другого фактора вимагає виконання спеціальних робіт з генералізації цифрової карти з формуванням її похідних оригіналів для усього використовуваного масштабного ряду [3-5], оскільки просте зменшення масштабу карти перетворює її у малозмістовну картинку, яка не відповідає картографічним вимогам.

Другою відмітною особливістю цифрових карт є їх багатошаровий характер з потенційною необмеженістю кількості тематичних шарів. При цьому, якщо вміст первинної цифрової картографічної основи головним чином диктується вимогами до вмісту топографічних карт і планів [3-5], то наступне її використання припускає суміщення з нею тематичних (галузевих) даних, одержуваних різними способами, що розрізняються за точністю і змістом, які подаються у різних масштабах і проекціях та віднесених до різних ділянок території і моментів часу. Нормативна точність деяких типів даних перевершує точність вихідних картоматеріалів при будь-якому виборі їх масштабу. Часто тематичні дані фіксуються на картах, проекція яких невідома. Крім того, при використанні матеріалів аерокосмічних зйомок необхідна фотограмметрична обробка даних. Як наслідок, виникають проблеми координування цих даних у цифровій карті і збалансованого подання картографічної інформації при реалізації електронних і комп'ютерних карт різних масштабів.

Третьою важливою особливістю цифрових карт (яка часто випускається з розгляду) є їх об'єктний характер. Якщо під цифровою картою розуміється модель території, а не просто графічне її відтворення у прийнятій системі умовних знаків, то повинні бути визначені просторові об'єкти, їх місце розташування, характеристики і взаємозв'язки. Тому просторово-координовані дані повинні подаватись у цифровій карті у «розпізнаному» вигляді. Практично це досягається за рахунок використання таких технологій цифрового картографування, які забезпечують:

- формування просторових об'єктів шляхом атрибутування елементів карти;
- визначення просторових відношень на основі використання векторних топологічних подань даних;
- визначення концептуальних відношень об'єктів за рахунок використання об'єктно орієнтованих засобів подання і обробки даних.

При цьому повинна бути забезпечена можливість довільного об'єктоутворення з формуванням ієрархічних групувань будь-яких елементів карти без обмежень за їх типами (точковий, лінійний або полігональний) і розміщенню у різних тематичних шарах. Отже, дані, що розміщені у цифровій карті, – різномасштабні, різночасові і нерівноточностні, просторово-координовані різними способами, але при цьому повинні утворювати багатошарову ієрархічно організовану об'єктну структуру, яка є моделлю території. Природні вимоги до моделі – точність, детальність, достовірність і актуальність, вступають у суперечності з характером використовуваних даних.

Існуючий стан забезпечення геопросторовими даними характеризується рівнем розвитку його складових, а саме: державної геодезичної та гравіметричної мережі; топографічним картографуванням; тематичним та спеціальним картографуванням; геодезичним та картографічним забезпеченням делімітації та демаркації державного кордону; інформаційними базами та банками геопросторових даних; геоінформаційними системами; розвитком державних кадастрів; правовою та нормативно-технічною базою, стандартизацією та оцінкою

відповідності; фундаментальними та прикладними науковими дослідженнями; картографо-геодезичним фондом України; міжнародним співробітництвом [7].

Сьогодні для регіональних геоінформаційних проектів гострою залишається проблема їх підтримки актуальними картографічними матеріалами. Наприклад, вихідні картографічні матеріали базового масштабу М 1:10 000 неоднорідні за часом формування не тільки на окремі райони області, але навіть на територію одного району. Різниця в часі відповідності інформації за окремими суміжними трапеціями може сягати 10-15 років. Повільне державне оновлення карт прискорило "старіння" картографічних матеріалів, а швидкі зміни структури власності і земельна реформа зробила їх взагалі не актуальними [7; 8].

Майже 70 % топографічних карт усіх масштабів на територію держави застаріли щонайменше на 15 років і не відповідають сучасному стану місцевості. Терміни періодичності оновлення топографічних карт, які встановлені „Основними положеннями створення та оновлення топографічних карт на територію України" повинні бути:

- для промислово розвинутих густонаселених територій – 5-7 років;
- для сільськогосподарських середньонаселених територій – 8-10 років;
- для гірських, лісових і степових малонаселених територій – 10-15 років.

Але ці терміни вже не задовольняють потреби держави і її суб'єктів у достовірній і точній картографічній інформації для прийняття оптимальних управлінських рішень в умовах динамічного розвитку суспільства [7; 8] (рис.2).

Рис.2. Діаграма стану необхідної актуалізації топографічних карт [7; 8]

Загальнодержавні топографо-геодезичні та картографічні роботи в Україні проводяться у відповідності до Української Перманентної Мережі Глобальних Навігаційних Супутникових Систем та національного картографування на 2003-2010 рр., затвердженої постановою Кабінету Міністрів України від 16.01.2003 р. №37. Цю програму розроблено на виконання Указу Президента України від 1 серпня 2001 р. № 575 "Про поліпшення картографічного забезпечення державних та інших потреб в Україні" з дотриманням вимог Закону України „Про топографо-геодезичну та картографічну діяльність", інших нормативно-правових актів, а також нормативно-технічних документів, що регулюють топографо-геодезичну та картографічну діяльності. Але постійне недофінансування цієї програми привело до загрозливого стану щодо актуальності топографічних карт.

Аналіз забезпеченості території країни просторовими даними, зокрема топографічними картами, свідчить, що 68 % топографічних карт всіх масштабів були створені або оновлені у 1980–1990 рр., 28 % – у 1991-1995 рр. і лише 0,9 % в останні 5 років минуло-

го століття [3; 4]. Аналогічний стан з топографічними планами масштабів 1:2000 і 1:5000 населених пунктів.

Відповідно до нормативів, відновлення картографічної продукції носить плановий циклічний та локально територіальний характер, що істотно збільшує час проведення подібних робіт і бюджетні видатки, а за умов дефіциту останніх має місце різке старіння державних топографічних карт.

Виходячи наведеного, неважко підрахувати, що для забезпечення території України сучасними топографічними картами та планами необхідно щорічно оновлювати близько 3800-4300 номенклатурних аркушів топографічних карт всіх масштабів та близько 1200 аркушів топографічних планів [7].

Крім того, чинні нормативи на державну картографічну продукцію сформовані за принципом максимально універсального відображення місцевості на карті за допомогою спеціально розроблених умовних знаків для кожного масштабу. На сучасному етапі це є надлишковим для вирішення конкретної предметної задачі й істотно здорожує процес створення карт. Як правило, конкретна задача з урахуванням сучасного рівня технологічного розвитку вимагає не просто одномоментного картографування місцевості, а моніторингу стану об'єктів, який неможливий без ДЗЗ та створення баз геопросторових даних.

Стан виробництва топографічних карт різних масштабів за даними [7] представлений на рис.3-6.

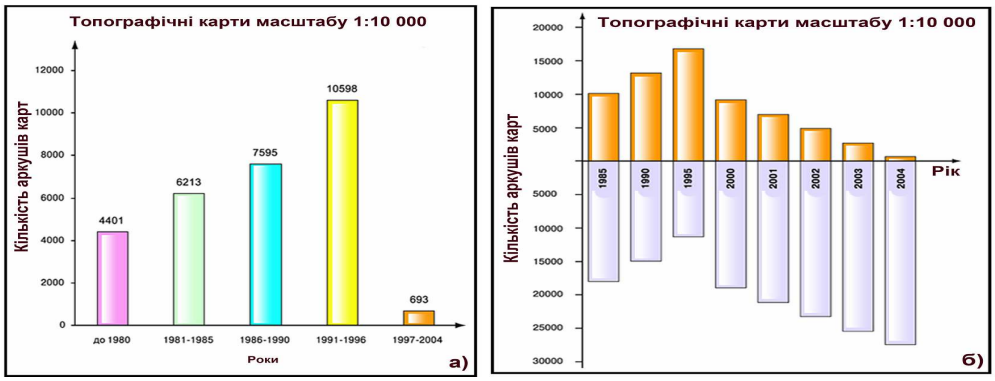


Рис. 3. Стан виробництва топографічних карт М 1:10 000:
а) гістограма оновлення карт за роками; б) гістограма зміни актуальності карт за роками

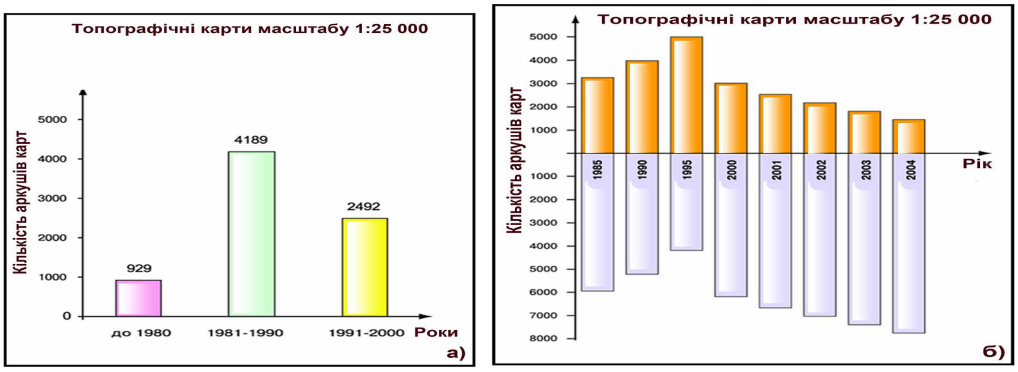


Рис. 4. Стан виробництва топографічних карт М 1:25 000:
а) гістограма оновлення карт за роками; б) гістограма зміни актуальності карт за роками

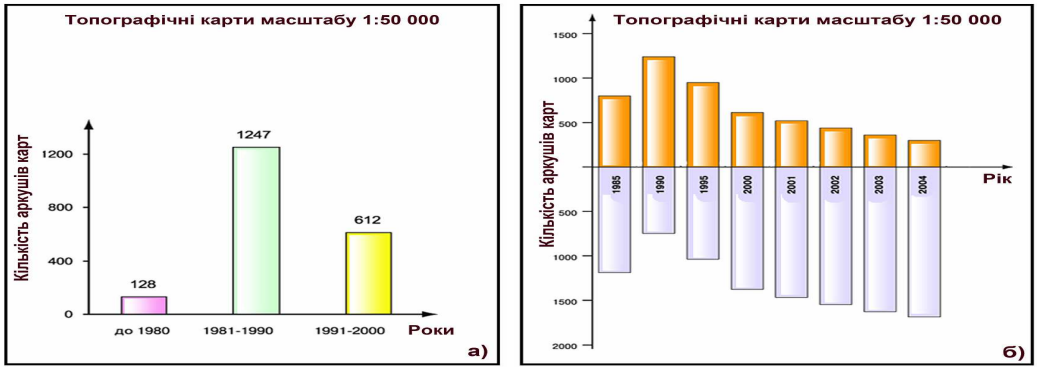


Рис. 5. Стан виробництва топографічних карт М 1:50 000:
а) гістограма оновлення карт за роками; б) гістограма зміни актуальності карт за роками

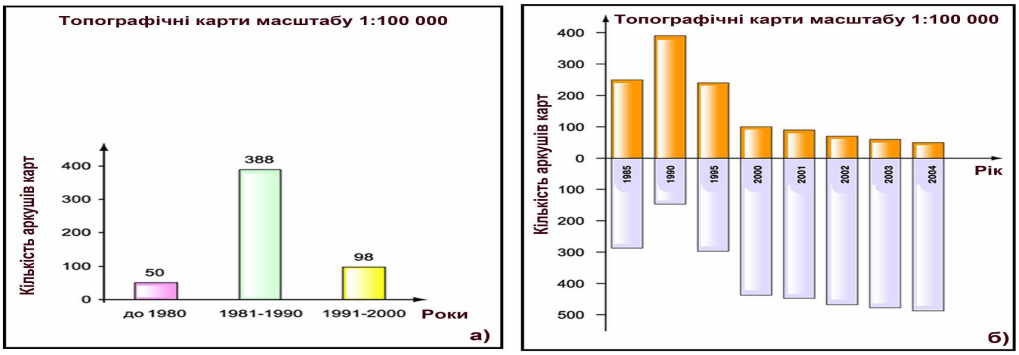


Рис. 6. Стан виробництва топографічних карт М 1:100 000:
а) гістограма оновлення карт за роками; б) гістограма зміни актуальності карт за роками

У зв’язку з цим, усі відомчі і великі корпоративні проекти приймають в якості просторового базису свій варіант картографічної основи, яка відрізняється, на їх погляд, ступенем актуальності й об’єктовим складом, але відповідає специфіці певної задачі, яка є більш дешевою і оперативною, аніж та, яку можна придбати у картографічних підприємств. Саме тому значна частина засобів, що спрямовується на відновлення картографічного матеріалу, має своїм джерелом бюджети зацікавлених суб’єктів і органів місцевого самоврядування або фінансується суб'єктами господарювання.

Крім того, в Україні відомства і господарчі суб’єкти змушені самостійно займатися координуванням низки об’єктів для забезпечення правового статусу вимірів, за які вони або несуть пряму відповідальність (земельний, лісовий, водний та інші кадастри), або у зв'язку з будівництвом, реконструкцією об'єктів нерухомості і захистом прав власності. При цьому відбувається дублювання геопросторових вимірів, самі вимірювання виконуються за різними методиками і вимогами, що призводить до неузгоджених і топологічно некоректних геопросторових даних. Це у свою чергу унеможливлює сумісне використання подібних даних, оскільки витрати на конвертацію і необхідну доробку досягають 80 % їхньої первісної вартості [7].

Для регіональних геоінформаційних проектів Чернігівської області проблема їх підтримки актуальними картографічними матеріалами є ще більш складною. Наприклад, вихідні картографічні матеріали базового масштабу М 1:10 000 неоднорідні за часом формування не тільки для усього регіону, але навіть на територію одного району.

Аналіз наявності картографічних матеріалів на територію Чернігівської області свідчить, що основним джерелом інформації для РГІС сьогодні є топографічні і тематичні карти на твердих носіях (на папері, лавсані, алюмінії тощо). Багато з них потребують додаткової попередньої обробки (фільтрації і трансформації растра) перед векторизацією. Ця картографічна інформація давно не оновлювалась і часто вкриває не всю територію регіону.

Топографічними і загальногеографічними картами середніх масштабів 1:500 000 і 1:200 000 вкритий весь регіон. З топографічними картами масштабу 1:50 000 ситуація трохи гірша. У картографічних установах із 126 номенклатурних листів у наявності виявилося лише 105 і датовані вони початком 90-х років XX століття.

За даними Державного картографо-геодезичного фонду України, картами масштабів 1:10 000 і 1:25 000 в системі координат СК-42 територія Чернігівської області покрита частково. Карти масштабу 1:10 000 актуалізовані станом на 1983-1996 рр., а масштабу 1:25 000 – станом на 1954-1994 рр.

Ортофотопланами масштабу 1:10 000, які виготовлені за матеріалами аерофотозйомки, територія регіону вкрита повністю, але більшість з цих матеріалів датовані до 1988 р.

Велике значення мають топографічні карти масштабу 1:2000, якими територія регіону покрита на 70 відсотків, котрі датовані 1986-1990 рр.

Про ситуацію з топопланами на районні центри і значні населені пункти регіону і їх актуальність можна судити з табл. 1, де частково відображений стан проблеми.

Таблиця 1

Наявність картографічного матеріалу на деякі населені пункти Чернігівської області

Найменування населеного пункту	Кількість номенклатурних аркушів топопланів		Рік створення
	М 1:5 000	М 1:2 000	
Батурин	10	22	1989-1991
Бахмач	27	–	1976-1977
Борзна	12	30	1984
Бобровиця	8	–	1981
Варва	7	18	1989
Добрянка	10	23	1990
Ічня	9	50	1988
Короп	12	31	1989
Корюківка	12	63	1985
Мена	13	33	1984
Ніжин	17	35	1980
Прилуки	13	49	1982
Срібне	7	16	1989
Щорс	10	–	1981
Талалаївка	11	33	1990

На деякі населені пункти виконана геодезична зйомка, але подальша обробка не здійснювалася через відсутність коштів.

У великих містах, наприклад, Чернігові, Ніжині, Прилуках, актуалізація цих матеріалів проводиться силами місцевих картографів, але фрагментарно і не комплексно. Також слід зазначити, що координати об’єктів суміжних аркушів часто не збігаються, що робить їх автоматичне зведення після цифрування практично неможливим. Крім цього, навіть існуючий топоматеріал важко одержати, тому що він має гриф “таємно”.

Цифрові матеріали на Чернігівську область існують тільки дрібних і середніх масштабів. При їх використанні часто виникають проблеми конвертації, точності і якості. У зв’язку з цим гостро стоїть питання обмінних форматів.

Висновки

Провівши аналіз наявності картографічних матеріалів як для держави, так і для регіону (Чернігівської області), можна зробити висновок, що основним джерелом даних для ГІС тепер залишаються топографічні і тематичні карти на твердих носіях (на папері, лавсані, алюмінії тощо), але більшість з них потребують актуалізації з додатковою попередньоою обробкою (фільтрацією і трансформацією растра) перед векторизацією.

Ситуація ускладнюється також часто недостатньою точністю математичної основи великомасштабних планів, що виявляються при проведенні GPS-вимірів; при достатньо точному взаємному координуванні близьких об'єктів їх прив'язка до системи координат підвернена доволі нерегулярним похибкам і в цілому уся територіальна структура по-

мітно деформована. В результаті збільшення масштабу вихідних матеріалів не дає очікуваного збільшення точності цифрової карти.

Актуалізацію наявних карт відносно швидко можна виконати шляхом застосування даних ДЗЗ.

Список використаних джерел

1. Капралов Е. Г. Геоинформатика / Е. Г. Капралов, А. В. Кошкарев, В. С. Тикунов и др. – М.: Академия, 2005. – 480 с.
2. Бурачек В. Г. Основи ГІС / В. Г. Бурачек, О. О. Железняк, В. І. Зацерковний. – Ніжин: ТОВ Видавництво «Аспект-Поліграф», 2011. – 512 с.
3. Условные знаки, образцы шрифтов и сокращения для топографических карт масштабов 1:25 000, 1:50 000, 1:100 000. – М.: ВТУГШ, 1973. – 42 с.
4. Условные знаки для топографической карты масштаба 1:10 000. – М.: Недра, 1977. – 143 с.
5. Условные знаки для топографических планов масштабов 1:5 000, 1:2 000, 1:1 000, 1:500. – М.: Недра, 1989. – 286 с.
6. Карпінський Ю. О. Стратегія формування національної інфраструктури геопросторових даних в Україні / Ю. О. Карпінський, А. А. Лященко. – К.: НДІГК, 2006. – 108 с.: іл. – (Сер. "Геодезія, картографія, кадастр").
7. Катренко І. М. Топографічне картографування / І. М. Катренко, Б. Д. Лепетюк, М. О. Трюхан, П. М. Шевчук // Державна картографо-геодезична служба України (1991-2006); за ред. Р. І. Сосси. – К.: НДІГК, 2006. – 376 с.: іл.

РОЗДІЛ V. ЕНЕРГЕТИКА

УДК 621.3:004.94

Н.В. Тітова, канд. техн. наук
Бердянський університет менеджменту та бізнесу, м. Бердянськ, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ВІТРОАГРЕГАТА В MATLAB/SIMULINK

Приведені результати моделювання та розрахунки вітрової турбіни вітроенергетичної установки в середовищі Matlab/Simulink. Для визначення максимальних значень потужності вітрогенератора використано алгоритм слідкування за точкою максимальної потужності.

Вступ

В останні роки розвиток відновлювальних джерел енергії привертає значну увагу внаслідок стурбованості про погіршення стану навколишнього середовища, про небезпечні наслідки аварій на атомних електростанціях, стійки тенденції зростання цін на нафту та газ, бажання користуватись електричною енергією у важкодоступних місцях. На сьогодні час отримання електрики від вітру пропонує економічну перспективу у використанні вітроенергетики. Різноманітні вітроенергетичні системи, які використовуються як для індивідуального використання, так і для промислового, стають все більш популярними в Україні і світі [1-4]. Відновлювальні джерела енергії у світі зараз забезпечують майже 15-20 % від загальної потреби [5]. У деяких сповіщається про зростання енергоспоживання втричі до 2050 року [6]. Згідно з даними American Wind Energy Association, установочна ємність вітряків зростає щорічно в середньому на 29 % [7].

У роботі ми будемо вести мову про моделювання аеродинамічних параметрів вітроенергетичної установки (ВЕУ) з горизонтально-осьовим вітровим генератором на постійних магнітах, який забезпечує живлення навантаження потужністю 0,8 кВт та електричних характеристик (рис.1). Головними технічними характеристиками ВЕУ, які, як правило, наводяться в описах, є залежності потужності та місячної виробки електроенергії від швидкості вітру. При чому ці залежності мають приблизний характер, оскільки реальні значення виробленої енергії залежить від розподілу швидкостей вітру.

Метою роботи є висвітлення питань щодо моделювання та розрахунків вітрової турбіни вітроенергетичної установки в середовищі Matlab/Simulink.

Результати й обговорення

Вітряна турбіна характеризується коефіцієнтом потужності вітроколеса (C_P), який залежить від коефіцієнта швидкохідності (λ) та настановного кута між площиною обертання вітроколеса та хордою крила (β). Для того, щоб максимально використати енергію вітру, λ повинен мати оптимальне значення. Коефіцієнт швидкохідності визначається як співвідношення кутової швидкості ротору ($\varpi = 2 \times \pi \times n/60$), де n – кількість обертів до швидкості вітрового потоку (V_B) [8], а саме:

$$\lambda = \frac{\varpi \times R}{V_B}, \quad (1)$$

де R – радіус вітроколеса. Вихідна потужність вітроколеса (P_{BK}) розраховується за допомогою наступного виразу [9]:

$$P_{BK} = \frac{1}{2} C_P \times \rho \times S \times R^2 \times V_B^3, \quad (2)$$

де ρ = *1.293 кг/м*^{3} – щільність повітря, S – робоча площа лопатей. Рівняння для обертального моменту, що утворений турбіною (T_{BK}), тепер можна отримати за допомогою виразів (1) і (2):

$$T_{BK} = \frac{P_{BK}}{\varpi} = \frac{1}{2\lambda} C_P \times \rho \times S \times R^3 \times V_B^3, \quad (3)$$

Коефіцієнт потужності (C_P) визначається як [10]:

$$C_P = \left[\frac{116}{\lambda_1} - (0{,}4\times\beta) - 5\right]\times 0{,}5\times e^{-16{,}5/\lambda_1}, \quad (4)$$

де $\lambda_1 = \left(\frac{1}{\lambda + 0{,}089\times\beta} - \frac{0{,}035}{\beta^3+1}\right)^{-1}$,

де $\beta=9^0$.

У розрахунках були використані наступні вихідні дані для ВЕУ з типом вітрогенератора PMG (permanent magnet generator – генератор на постійних магнітах): номінальна потужність – 800 Вт; діаметр вітроколеса – 3,1 м; максимальна експлуатаційна швидкість вітру – 50 м/с; стартова швидкість вітру – 2,5 м/с. На рис.1 зображена загальна блок-схема ВЕУ.

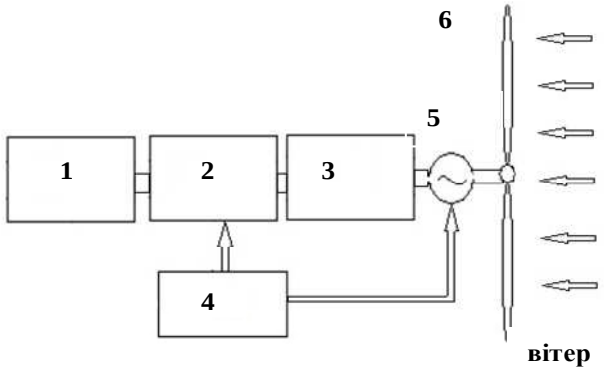


Рис.1. Блок-схема ВЕУ
1 – навантаження; 2 – підсилювач напруги; 3 – діодний випрямляч; 4 – контролер; 5 – генератор; 6 – вітрова турбіна

Розрахунки здійснювались з використанням пакету MATLAB/SIMULINK. На основі рівнянь (1) – (4) складена модель вітряної турбіни, яка зображена на рис. 2.

Виходячи з критерію Бетца, який є справедливим для будь-якого енергетичного устаткування, обтічного вільним потоком рідини або газу, максимальне значення коефіцієнта потужності (C_P) складає 0,592. У кращих промислових ВЕУ коефіцієнт потужності досягає приблизно 0,4 [11]. На рис. 3 зображено розрахункову залежність коефіцієнта потужності від швидкохідності вітроколеса. Вона має форму гладкої кривої з максимумом $C_P = 0{,}34$ при $\lambda = 6{,}0$.

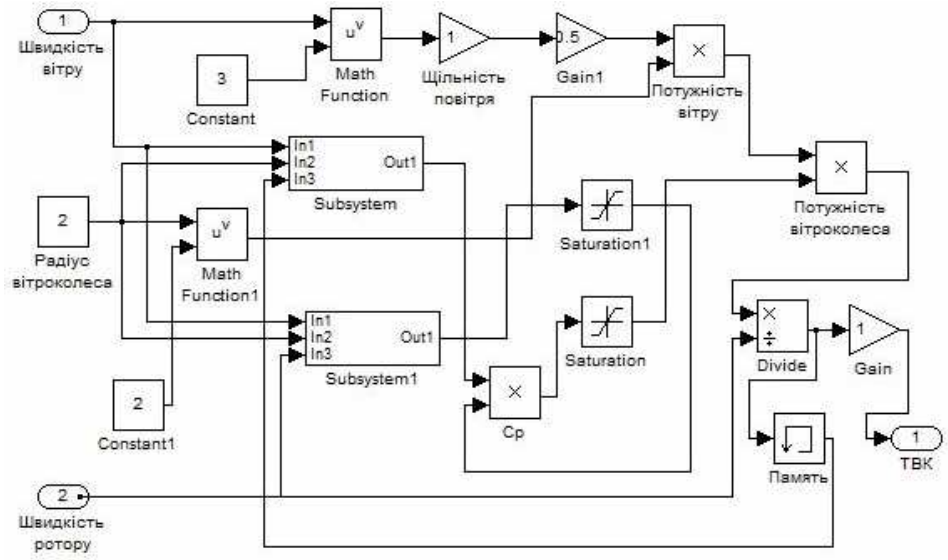


Рис.2. Модель розрахунку вітряної турбіни

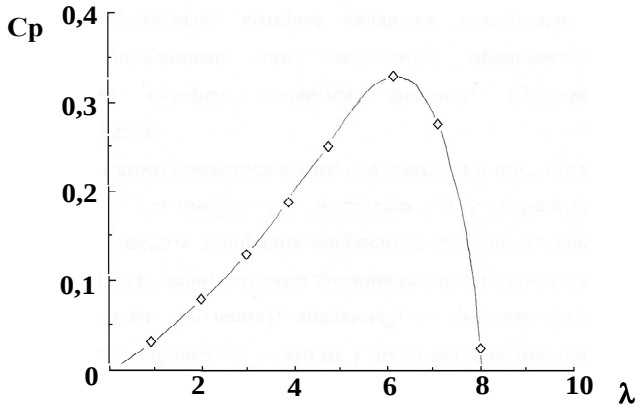


Рис.3. Залежність коефіцієнта потужності вітроколеса Ср від коефіцієнта швидкості (лямбда)

На рис. 4 наведені графіки залежності вихідної потужності вітроколеса ($P_{ВК}$) від кутової швидкості ротора (ω) для різних значень швидкості вітру.

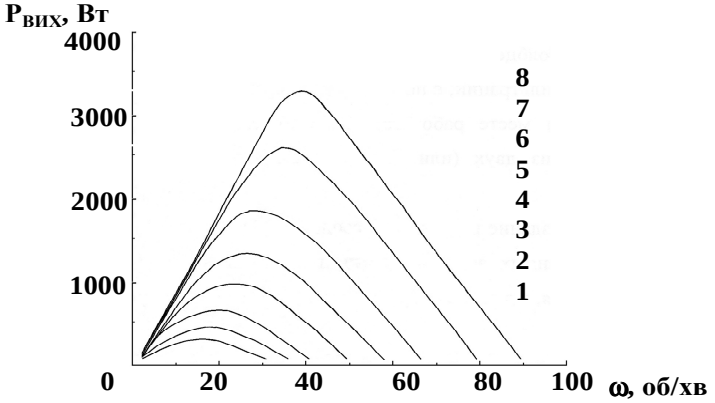


Рис. 4. Залежності вихідної потужності вітроколеса від кутової швидкості ротора для різних значень швидкості вітру (1 – 5 м/с, 2 – 7 м/с, 3 – 9 м/с, 4 – 10 м/с, 5 – 11 м/с, 6 – 12 м/с, 7 – 13 м/с, 8 – 14 м/с)

На рис. 5 зображені криві залежності обертального моменту ($T_{ВК}$) від кутової швидкості ротора (ω) для різних значень швидкості вітру.

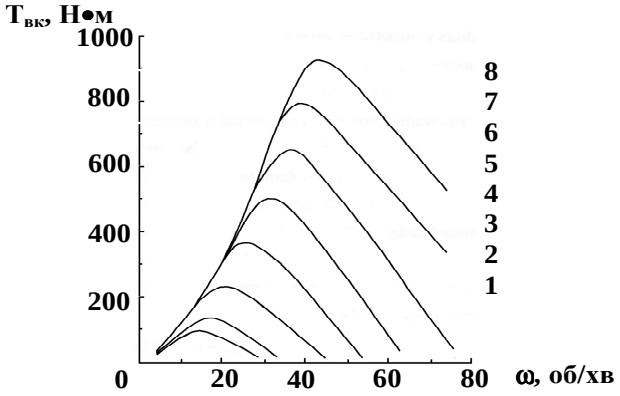


Рис. 5. Залежності обертального моменту вітроколеса від кутової швидкості ротора для різних значень швидкості вітру (1 – 5 м/с, 2 – 7 м/с, 3 – 9 м/с, 4 – 10 м/с, 5 – 11 м/с, 6 – 12 м/с, 7 – 13 м/с, 8 – 14 м/с)

Крива максимальної потужності вітроколеса зображена на рис. 6.

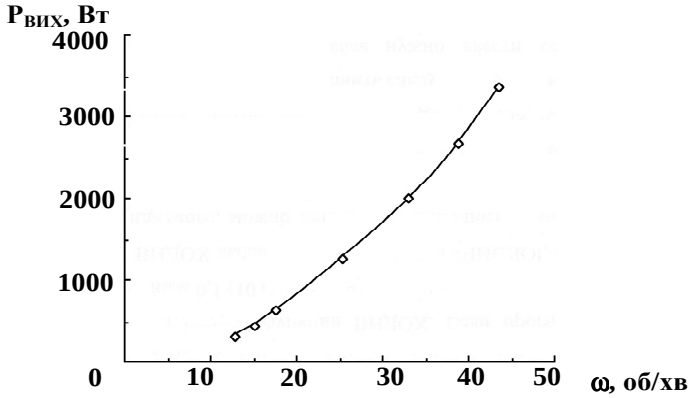


Рис. 6. Крива точок максимальної потужності вітроколеса

Швидкість ротора варіюється зі зміною швидкості повітря для турбін з аеромеханічною системою обмеження частоти обертання вітротурбіни для того, щоб утримувати оптимальний λ, тобто C_P утримує максимальне значення, поки потужність або швидкість ротора знаходяться нижче цих значень. Кут між площиною обертання вітроколеса та хордою крила при високих швидкостях вітру керується для того, щоб обмежувати вхідний потік на турбіну, коли вона досягла встановленої потужності.

Наведені показники (рис. 3-6) мають важливе значення тому, що визначають початковий обертальний момент вітротурбіни та показують на ефективність перетворення потужності вітру.

Висновки

У запропонованій моделі є можливість обирати геометричні параметри вітрової турбіни, коефіцієнт швидкохідності та коефіцієнт потужності і розраховувати динамічні характеристики ВЕУ, використовувати результати моделювання для побудови нових моделей вітроагрегатів.

Список використаних джерел

1. Ackermann T., Solder L. An overview of wind energy status// Renewable & Sustainable Energy Reviews. – 2002. – N6. – P.67-128.

2. Коробко Б. Енергетика та сталий розвиток: Інформаційний посібник для українських ЗМІ / Б. Коробко. – К.: ВЕГО “МАМА-86”, 2007. – 40 с.

3. Richardson R.D., McNerney G. Wind energy system //IEEE Proc. 1993. – Vol.81, No.3. – P. 378-389.

4. Generator and power electronics technology for wind turbines/ Hansen L.H., Blaabjerg F., Christensen H.C. and all// Proceedings of IECON-01. – 2001. Vol.3, – P.2000-2005.

5. El-Tamaly H.H., Mohammed A.A.E. Modeling and simulation of photovoltaic-wind hybrid electric power system// 12 International Middle-East Power System Conference MEPCON-08, – 2008. 12-15 March, – P.645-649.

6. Abbas E.A.R., Abdulsala M.A. Simulation of wind-turbine speed control by MATLAB// International Journal of Computer and Electrical Engineering. – 2010. V.2. – № 5. – P.912-915.

7. Pao L.Y, Johnson K.E. A tutorial on the dynamics and control of wind turbines and wind farms// American Control Conference Hyatt Regency Riverfront, – 2009. 10-12 June., – P.2076-2089.

8. Neammanee B., Sirisumrannukul S., Chatratana S. Development of a wind turbine simulator for wind generator testing// International Energy Journal. – 2007. – №8. – P.21-28.

9. Modeling of the wind turbine with a doubly fed induction generator for grid integration studies/ Y. Lei, A. Mullane, G. Lightbody, R. Yacamini// IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2006. – V.21. – №1. – P. 257-264.

10. Anandavel P., Rajambal K., Chellamuthu C. Power optimization in a grid-connected wind energy conversion system// IEEE Conference PEDS-2005. – 2005. 28-01 Nov., – P.1617-1621.

11. Rajambal K., Chellamuthu C. Modeling and simulation of grid connected wind electric generating systems// Proc. IEEE TENCON. – 2002. – P.1847-1852.

УДК 621.311

С.П. Колесник, инженер
ПАО «Электротехнический завод», РЕЛСиС®, г.Киев, Украина

ПУТИ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ В СЕТЯХ 6-35 кВ НА ИННОВАЦИОННЫХ ИЗДЕЛИЯХ «РЕЛСИС»

Рассмотрено возможные пути решения проблем релейной защиты в распределительных электрических сетях напряжением 6-35 кВ на инновационных изделиях «РЕЛСИС».

Введение

В настоящее время в схемах релейной защиты и автоматики используются три поколения устройств: электромеханические, микроэлектронные и микропроцессорные. Основную массу составляют электромеханические измерительные и логические реле, а также комплектные устройства на их базе, большинство из которых проработало уже более 25-30 лет, морально и физически устарели, их гарантийный срок эксплуатации уже значительно превышен. Количество находящихся в эксплуатации простых электромеханических и статических реле в СНГ составляет более 30 млн штук на сумму более 26 млрд рублей в ценах 2006 г. [1].

Исходя из принятого допущения, что количество находящихся в эксплуатации реле и устройств РЗА в Украине составляло примерно 20 % от всех устройств РЗА СНГ, можно сделать вывод, что соответственно количество реле в Украине составляет более 6 млн штук на сумму около 3 млрд грн.

В связи с этим вопросом, во избежание неминуемых отказов релейной защиты, эксплуатирующим организациям потребуется решать задачи замены, отслуживших свой срок, старых реле на новые. ПАО «Электротехнический завод «РЕЛСиС» (г. Киев) разработал и наладил выпуск современных микропроцессорных реле и устройств РЗА на любой бюджет.

Варианты решения задач РЗА в сетях 6-35 кВ на инновационных изделиях «РЕЛСИС»

Завод «РЕЛСиС» предлагает несколько вариантов решения по переоснащению устройств РЗА в зависимости от финансовых возможностей предприятия:

- замена электромеханических устройств РЗА на новые простые реле «РЕЛСиС»;
- упрощенные микропроцессорные устройства защиты и автоматики серии РЗЛ-03;
- универсальные микропроцессорные устройства РЗА серии РЗЛ-01, РЗЛ-02, РЗЛ-04;
- многофункциональные устройства серии СЕЗАМ.

Новые простые реле энергетики

Для замены электромеханических реле производства ОАО «ЧЭАЗ» заводом «РЕЛСиС» предлагается разнообразная гамма статических реле (тока, напряжения, времени, контроля), выполненных на современной микропроцессорной и микроэлектронной базе, и промежуточных реле.

Простые реле выпускаются в двух вариантах конструкции: традиционные прямоугольные корпуса, совпадающие по габаритным и установочным размерам с устаревшими реле-аналогами, и реле модульной конструкции с возможностью установки на DIN-35 рейку.

Номенклатура простых реле традиционной конструкции приведена в таблице 1.

Внешний вид реле тока АЛ-5 традиционной конструкции приведен на рисунке 1.

Номенклатура простых реле модульной конструкции приведена в таблице 2, а внешний вид модульного реле напряжения НЛ-6А-1 – на рисунке 2.

Таблица 1

Номенклатура простых реле традиционной конструкции

Серии реле	Заменяемые аналоги
Реле тока АЛ-1, АЛ-3, АЛ-3-В, АЛ-3-ОВ, АЛ-4, АЛ-4-1, АЛ-5-1…	РСТ11…14, РСТ40, РСТ11М, РТ40, РТ140, РС40М, -М1, -М2, -М21, РТ3-51, РТ3- 51.01, РТ-81…86, РТ-91…96, РС80М2-1…15
Реле напряжения НЛ-4, НЛ-5, НЛ-6, НЛ-7, НЛ-8, НЛ-9, НЛ-11	РСН14…18, РН53, РН153,РН54, РН154, РСН50-1…7
Реле времени ВЛ100А, ВЛ101А, ВЛ102, ВЛ103, ВЛ-103А, ВЛ104, ВЛ104А, ВЛ108	РВ100, РВ200, ЭВ100, ЭВ200, РВ-01, РВ-03, РСВ14, РСВ18-13, РВМ-12, РВМ-13, РСВ13, РСВ160, РСВ255, РСВ260, РВП01
Реле контроля ЕЛ-17, ЕЛ-18	РН51, РСН151, РСН11
Реле контроля трехфазного напряжения ЕЛ-11, ЕЛ-12, ЕЛ-13	РОФ-11, -12, -13, РСН-25, -26, -27
Реле промежуточные ПЭ-40, ПЭ-42	РП23,РП25, РП16-1,5,6,7, РП16-1М, -7М, РЭП36-11, -21, РЭП-36, РП16-2…4, РЭП36-12, РЭП36-13, РЭП36-14, РП255, РП232
Реле промежуточные быстродействующие ПЭ-41, ПЭ-43	РП17-1, РП17-2, РП17-3, РП17-4, РП17-5, РП-220, РЭП37-13
Реле промежуточные с замедлением ПЭ-44, ПЭ-45	РП18-1…0, РЭП37-111, -112, -113, -121, -221, РП250, РЭП96, РП18М
Реле промежуточные двухпозиционные ПЭ-46	РП-11, РП-12, РП-11М, -12М, РЭП38Д
Реле световой сигнализации ЕЛ-20	ППБ1…ППБ4, УПП, РСВ18-31

Рис. 1. Внешний вид реле тока АЛ-5 традиционной конструкции

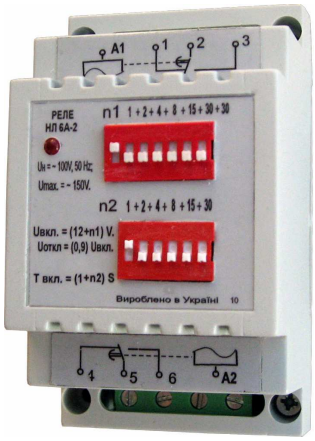


Рис. 2. Внешний вид реле напряжения НЛ-6А-1 модульной конструкции

Особенности статических реле для энергетики:

- рабочая температура от минус 40 до плюс 55 °С;
- конструкция реле универсальна, монтаж с передним и с задним присоединением проводов, имеются исполнения реле для установки на DIN-35 рейку;
- ступенчатая регулировка уставок срабатывания с дискретностью 1 %;
- отсчет уставок (времени, тока, напряжения) привычный десятичный, а не в двоичном коде суммированием перемычек;
- высокая точность: погрешностью 1-2 %, повторяемость 0,5-1 %;

- фиксированный порог срабатывания и отпускания для исключения ложной работы при КЗ в цепях оперативного питания;

- визуальный контроль и возможность оперативного изменения уставок, реле имеют прозрачную крышку с возможностью её пломбирования;

- светодиодная индикация срабатывания выходного реле.

Таблица 2

Номенклатура простых реле модульной конструкции

Серии реле	Тип реле
Реле тока	АЛ-1А
Реле напряжения	НЛ-6А, НЛ-7А, НЛ-8А, НЛ-9А, НЛ-6А -1, НЛ-7А-1,НЛ-6А-2,НЛ18-1, НЛ18-2, НЛ-19
Реле времени	ВЛ-162, ВЛ-73А, ВЛ-76А, ВЛ-79А, ВЛ-102А, ВЛ100А-1,ВЛ -101А-1
Реле контроля трехфазного напряжения	ЕЛ-11А, ЕЛ-12А, ЕЛ-13А, ЕЛ-21, ЕЛ-22Н, ЕЛ-23
Реле контроля изоляции	ЕЛ-17А
Реле промежуточные	ПЭ- 40А, ПЭ-41А
Реле промежуточные с замедлением	ПЭ- 44А, ПЭ-45А
Реле промежуточные двухпозиционные	ПЭ-46А
Фотореле	ФР-02, ФР-03, ФР-04
Реле световой сигнализации	ЕЛ-20А, ЕЛ-2И

Состав комплекса реле для энергетики

Реле тока:

Двухфазные реле максимального тока без оперативного питания:

- **АЛ-3** – без выдержки времени;

- **АЛ-3-В** – с независимой выдержкой времени;

- **АЛ-3-ОВ** – с независимой и двумя зависимыми характеристиками срабатывания типа РТ-80 и РТВ-1 (по выбору с лицевой панели);

- **АЛ-5** – двухступенчатые (ТО+МТЗ), с независимой и двумя зависимыми характеристиками срабатывания типа РТ-80 и РТВ-1 (по выбору с лицевой панели);

- **АЛ-4** – однофазные реле максимального тока для использования в схемах защит от замыкания на землю.

Реле времени:

- **ВЛ-100А, ВЛ-102,ВЛ-102А** – одно-, двух-, трехцепные реле времени с выдержкой на срабатывание с мгновенным, проскальзывающим и замыкающим (переключающим) контактом;

- Одно-, двух-, трехцепные реле времени с выдержкой на отпускание с мгновенным, проскальзывающим и замыкающим (переключающим) контактом – **ВЛ103, ВЛ101А,** в т.ч. с регулируемым порогом отпускания (**ВЛ103А**);

- **ВЛ104, ВЛ104А** – трехцепные реле времени с двумя проскальзывающими и одним замыкающим контактами, с питанием от токовых цепей двух фаз;

- **ВЛ108** – реле однократного повторного включения с оперативным питанием постоянного или переменного тока.

Реле напряжения:

- **НЛ4** – реле максимального напряжения переменного тока с оперативным питанием и широким диапазоном уставок по напряжению от 10 до 500 В в одном исполнении;

- **НЛ5** – реле минимального напряжения переменного тока с оперативным питанием и широким диапазоном уставок по напряжению от 10 до 500 В в одном исполнении;

- НЛ6 – реле максимального напряжения переменного тока без оперативного питания, для монтажа на DIN-35 рейку – **НЛ6А**;

- НЛ6А-1 – реле максимального напряжения переменного тока с широким диапазоном уставок срабатывания, для монтажа на DIN-35 рейку;

- НЛ7 – реле минимального напряжения переменного тока без оперативного питания, для монтажа на DIN-35 рейку – **НЛ7А**;

- НЛ8 – реле максимального напряжения постоянного тока без оперативного питания, для выступающего монтажа на DIN-35 рейку – **НЛ8А**;

- НЛ8А-1 – реле максимального напряжения постоянного тока с широким диапазоном уставок срабатывания для монтажа на DIN-35 рейку;

- НЛ9 – реле напряжения постоянного и переменного тока с двумя порогами срабатывания и отпускания, для монтажа на DIN-35 рейку – **НЛ9А**;

- НЛ11 – реле минимального напряжения трехфазного тока с задержкой выходного сигнала и контактами мгновенного действия;

- НЛ18-1 и НЛ18-2 – реле соответственно максимального и минимального напряжения постоянного и переменного тока с цифровой индикацией значения контролируемого напряжения без оперативного питания для монтажа на DIN-35 рейку;

- НЛ19 – реле напряжения постоянного и переменного тока с двумя программируемыми порогами срабатывания и отпускания, с цифровой индикацией значения контролируемого напряжения без оперативного питания для монтажа на DIN-35 рейку.

Реле контроля:

- ЕЛ17 – реле контроля изоляции цепей постоянного тока;

- ЕЛ18 – реле контроля уровня пульсаций в цепях постоянного тока;

- ЕЛ20 – прерыватель импульсный (пульс-реле) для цепей постоянного и переменного тока с равным временем включения-отключения (для монтажа на DIN-35 рейку – **ЕЛ20А**).

Промежуточные реле для энергетики:

- ПЭ-40 – промежуточные реле постоянного и переменного тока с катушками включения от напряжения и тока;

- ПЭ-41 – быстродействующие промежуточные реле постоянного и переменного тока с временем срабатывания до 0,011 с;

- ПЭ-42 – промежуточные реле со срабатыванием от обмотки напряжения и удержание обмотками тока (до 3-х), а также со срабатыванием от обмотки тока и удержание в притянутом состоянии от обмотки напряжения;

- ПЭ-43 – быстродействующие промежуточные реле постоянного и переменного тока с удерживающими обмотками и временем срабатывания до 0,011 с;

- ПЭ-44 – промежуточные реле с замедлением при срабатывании, в т.ч. с возможностью удержания в притянутом состоянии от токовых обмоток;

- ПЭ-45 – промежуточные реле постоянного и переменного тока с катушками включения от напряжения и замедлением на возврат;

- ПЭ-45-21 – промежуточные реле со срабатыванием от обмотки напряжения, удерживающей токовой обмоткой и замедлением на возврат;

- ПЭ-46 – двухпозиционные реле постоянного и переменного тока с управлением напряжением импульсно.

Особенности промежуточных реле для энергетики производства завода «РЕЛСиС»:

1) количество контактов до 8 групп в разных сочетаниях;

2) время срабатывания незамедленных реле ПЭ40 **до 30 мс**, у быстродействующих реле ПЭ41, ПЭ43 для защит сверхвысокого напряжения до 10 мс;

3) порог срабатывания реле постоянного тока находится в пределах **0,6-0,65 Uном**; а порог отпускании – в пределах **0,3-0,4 Uном**;

4) потребление обмоток параллельного включения на постоянном токе не более **6 Вт**, что обеспечивает возможность их замыкания и особенно размыкания маломощными контактами измерительных реле, потребление промреле на переменном токе не более 10 ВА;

5) мощность контактов достаточна для прямого действия на отключающую катушку выключателя;

6) коммутационная способность (обеспечивают включение нагрузки):

- на постоянном токе до 15 А, отключение – 0,25 А;
- на переменном токе – до 1000 ВА при Cosϕ ≈ 0,5;

7) количество срабатываний: до 50 000 под нагрузкой и 100 000 без нагрузки;

8) имеется возможность визуального наблюдения за перемещением контактов без снятия корпуса (прозрачная крышка в месте расположения контактов);

9) конструкция реле обеспечивает установку выступающим монтажом над лицевой панелью;

10) по роду присоединения внешних проводников реле выполняются для выступающего исполнения как с передним, так и с задним присоединением проводов (в одном исполнении без дополнительных деталей, шпилек и т.п.);

11) негорючесть и огнестойкость по требованиям для необслуживаемых устройств:

- корпуса до 650 °С;
- клеммники и детали, удерживающие токоведущие части, – до 960 °С;

12) вибро- и ударопрочность, в т.ч. сейсмостойкость при землетрясении до 9 баллов, а именно: вибрация 1-100 Гц при ускорении до 2g; многократные удары до 3g длительностью до 20 мс;

13) выводы реле для присоединений внешних проводников должны допускать присоединение двух проводов сечением 1,5 мм², токовых обмоток – одного провода сечением до 4 мм²;

14) контакты реле - только замыкающие и размыкающие;

15) схемы подключения, габаритные, присоединительные размеры, сочетания удерживающих обмоток и контактов как в реле РП16 - РП18;

16) возможность перестройки контактов с одного исполнения на другое.

Так как реле могут месяцами и годами находиться под напряжением, то основным требованием в промреле является электрическая, механическая и термическая прочность обмоток катушек (устойчивость к перенапряжениям до 2 Uном до 10 с и импульсно до 5 кВ – 10 мс, нагревание обмоток более 100 °С требует правильного выбора обмоточного провода с соответствующим классом нагревостойкости и условием токовых перегрузок до 3 I ном. длительно и 30 I ном. в течение 1 с).

Упрощенные микропроцессорные устройства защиты и автоматики серии РЗЛ-03

Устройства серии РЗЛ-03 являются функциональным аналогом двух электромеханических реле типа РТ-80, РТ-90 и микроэлектронных РС-80М2, УЗА-АТ, отслуживших свой срок и требующих замены на современные микропроцессорные устройства.

В устройстве **РЗЛ-03** реализованы четыре основных требования:

1. Является полной заменой реле РТ-80, РС-80М2, имеет ту же форму корпуса и является аналогичным по условиям эксплуатации (температура от -40 до +55 ˚С), имеет схемы привязки под различные типы выключателей, что упрощает проектные работы и монтаж на подстанции, имеет аналогичные функции, в том числе питание от токов КЗ при отсутствии оперативного напряжения на подстанции.

2. Обладает дополнительными неоспоримыми преимуществами по сравнению с микроэлектронными и электромагнитными реле:

- постоянная самодиагностика – реле неисправности указывает на работоспособность устройства;

- дополнительные функции защиты – ускорение МТЗ; оперативное ускорение; блокировка ТО; блокировка МТЗ, АПВ, ЛЗШ, АЧР, ЧАПВ; защита двигателя от асинхронного хода;

- дополнительные функции по контролю – измерение и отображение фазных токов; контроль исправности цепей управления выключателем;

- дополнительные функции по индикации – отображение параметров последней аварии на дисплее (фазные токи) и светодиодах (сработавшие функции, работа входов и т.д.).

3. Имеет упрощенное меню и его визуализация облегчает работу релейного и оперативного персонала с устройством РЗЛ-03. Меню содержит все необходимые уставки и параметры для использования реле, указывает параметры последней аварии, легко квитируется кнопкой управления либо ключом управления по входу устройства. Микропроцессорное устройство РЗЛ-03 отличается простотой и удобством в обслуживании.

4. Имеет привлекательную и конкурентоспособную цену по сравнению с микроэлектронными реле и аналогичным решением на электромеханических реле.

Эксплуатационные возможности устройства РЗЛ-03:

- возможность работы как с вакуумными, так и с масляными типами высоковольтных выключателей, в т.ч. со схемой дешунтирования;

- задание внутренней конфигурации (ввод/вывод защит и автоматики);

- отображение с помощью светодиодных индикаторов состояния дискретных входов, пусков работы МТЗ, неуспешного АПВ и т.п.;

- выбор типа времятоковой характеристики;

- жесткое и свободное назначение дискретных выходов на функции пуска/работы МТЗ, АПВ, ЛЗШ, ДВ;

- регистрация и хранение параметров последнего аварийного события;

- индикация до сброса (с запоминанием) срабатывания ТО, МТЗ, АПВ, ДВ;

- возможность сброса индикации с передней панели или дистанционно;

- питание схемы устройства только от контролируемых токовых цепей;

- непрерывный контроль работоспособности (самодиагностику) в течение всего времени работы;

- блокировка всех выходов при неисправности устройства для исключения ложных срабатываний;

- конструктивные исполнения: с утопленным и выступающим монтажом.

Внешний вид устройства РЗЛ-03 приведен на рисунке 3.

Функции защиты, выполняемые устройством:

1) трехступенчатая максимальная токовая защита от междуфазных повреждений с контролем двух/трехфазных токов;

2) возможность работы МТЗ в режиме ускоряющей отсечки с возможностью выбора активных ступеней для ускорения;

3) одноступенчатая ненаправленная защита от однофазных замыканий на землю;

4) функция логической защиты шин (ЛЗШ);

5) возможность подключения внешних защит;

6) операции отключения и включения выключателя;

7) функция однократного/двукратного АПВ после работы МТЗ или ДВ, работа АПВ по назначенным ступеням МТЗ;

8) функция УРОВ по назначенным ступеням МТЗ;

9) фиксация параметров аварии в момент срабатывания защиты;

10) встроенные часы-календарь;

11) измерение текущих фазных токов и их отображение в первичных/вторичных значениях на светодиодном индикаторе.

Универсальные микропроцессорные устройства РЗА для сетей 6-35 кВ серии РЗЛ-01, РЗЛ-02, РЗЛ-04

Эксплуатационные возможности:

- выполнение функций защит, автоматики и управления, определенных ПУЭ и ПТЭ;
- задание внутренней конфигурации (ввод/вывод защит и автоматики);
- ввод, просмотр и хранение 2 групп уставок защит и автоматики;
- свободное назначение светодиодных индикаторов для отображения состояния дискретных входов, пусков/работы МТЗ/ЗНЗ, успешного/неуспешного АПВ, ускорения МТЗ, а также других защитных и сервисных функций;
- свободное ранжирование состояний логических функций и дискретных входов/выходов на 16 каналов осциллографа;
- получение дискретных сигналов управления и блокировок, в т.ч. квитирование аварий, запуск осциллографа по ДВ;
- телеуправление, телеизмерение, передача параметров аварии, ввод и изменение уставок по линии связи;
- непрерывный оперативный контроль работоспособности (самодиагностика) в течении всего времени работы;
- блокировка всех выходов при выявлении контролирующей системы неисправности устройства для исключения ложных срабатываний;
- гальваническая развязка всех входов и выходов, включая питание, для обеспечения высокой помехозащищенности.

Внешний вид устройства РЗЛ-01 приведен на рисунке 4.

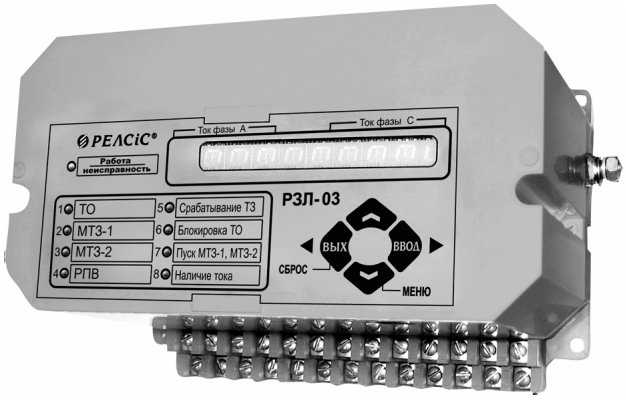


Рис. 3. Внешний вид устройства РЗЛ-03

Рис. 4. Внешний вид устройства РЗЛ-01

Функции защиты:

1) трехступенчатая максимальная токовая защита от междуфазных повреждений с контролем двух/трехфазных токов;
2) возможность работы МТЗ в режиме ускоряющей отсечки с возможностью выбора активных ступеней для ускорения;
3) одноступенчатая ненаправленная защита от однофазных замыканий на землю;
4) направленная двухступенчатая защита от однофазных коротких замыканий на землю (только РЗЛ-04);
5) функция логической защиты шин (ЛЗШ);
6) возможность подключения внешних защит;
7) направленная максимальная токовая защита (только РЗЛ-02);
8) АЧР – автоматическая частотная разгрузка (только РЗЛ-02, РЗЛ-04);
9) ЧАПВ – частотное автоматическое повторное включение (только РЗЛ-02, РЗЛ-04);
10) ЗМН – защита минимального напряжения (только РЗЛ-02);
11) ЗПН – защита от повышения напряжения (только РЗЛ-02).

Функции автоматики и дополнительные сервисные функции:

- операции отключения и включения выключателя по внешним командам;
- функция однократного/двукратного АПВ после работы МТЗ или ДВ, работа АПВ по назначенным ступеням МТЗ;
- функция УРОВ по назначенным ступеням МТЗ;
- фиксация токов в момент срабатывания защиты;
- встроенные часы-календарь;
- измерение текущих фазных токов и их отображение в первичных/вторичных значениях на ЖКИ;
- цифровой осциллограф (энергонезависимый);
- журнал событий (энергонезависимый);
- журнал статистики (энергонезависимый);
- возможность выбора языка интерфейса для ЖКИ (русский, украинский, английский).

Номенклатура микропроцессорных устройств (МПУ) релейной защиты и автоматики для распределительных сетей 6/35 кВ завода «РЕЛСиС»:

РЗЛ-01.01 – МПУ токовой защиты и автоматики присоединений с расширенными функциональными возможностями;

РЗЛ-01.02 – МПУ токовой защиты и автоматики присоединений с расширенными функциональными возможностями с возможностью питания от токов короткого замыкания;

РЗЛ-01.03 – МПУ токовой защиты и автоматики присоединений с расширенными функциональными возможностями с возможностью питания от токов короткого замыкания и функцией дешунтирования;

РЗЛ-02-Л – защита воздушной и кабельной линии 6-35 кВ по току и напряжению (направленная);

РЗЛ-02-ВВ – защита ввода 6-35 кВ по току и напряжению;

РЗЛ-02-СВ – защита секционного выключателя 6-35 кВ по току и напряжению;

РЗЛ-04 – устройство релейной защиты для кабельных и карьерных линий.

Многофункциональные устройства серии СЕЗАМ

В устройствах серии СЕЗАМ заложены самые современные принципы. Логика функционирования строится на базе библиотеки стандартных функций ANSI с использованием современных открытых языков высокого уровня. Модульный принцип построения конструкции позволяет оптимизировать ее в соответствии с решаемой задачей, что позволяет достичь наилучших показателей «цена/функциональность».

Внешний вид устройства СЕЗАМ приведен на рисунке 5.

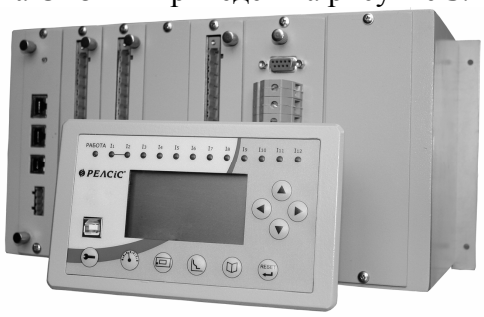


Рис. 5. Внешний вид устройства СЕЗАМ

Серия СЕЗАМ обладает всеми стандартными функциями микропроцессорных защит – функциями защиты, измерения, автоматики, диагностики сети и коммутационного аппарата, самодиагностики, цифрового осциллографирования и связи по открытому протоколу MODBUS. При этом необходимо подчеркнуть, что устройство, соответствуя всем необходимым требованиям к перспективному развитию системы, не перегружено избыточными функциями, что позволяет обеспечить оптимальное соотношение цены и качества.

Устройство СЕЗАМ состоит из двух блоков: базовый модуль, который устанавливается непосредственно в шкафах, релейных отсеках КРУ, и выносной пульт управления, который соединяется с основным блоком с помощью интерфейсного кабеля.

Базовый модуль хранит и выполняет программу логики работы. Пульт управления хранит меню пользователя, выполняет функции отображения текущих параметров и редактирования уставок.

Набор унифицированных аппаратных решений, а также большая библиотека стандартных функций защиты и автоматики устройств серии СЕЗАМ позволяют быстро создать устройство под ваши потребности.

Выводы

Сегодня наше предприятие видит своей стратегической целью разработку и создание инновационной наукоемкой продукции, с гибкой аппаратно-программной структурой конфигурирования, с возможностью телеизмерения и телеуправления, а также возможностью их применения в существующих комплектных устройствах управления и защиты.

В сегодняшних непростых экономических условиях, как никогда, актуальными становятся вопросы применения инновационных технологий экономии ресурсов и электроэнергии, их грамотном внедрении для снижения издержек производства, принятия правильного решения в выборе нужной продукции при оптимальных затратах на его приобретение. Причем продукции, рассчитанной в конечном итоге на повышение надежности, простоту и удобство обслуживания.

Список использованных источников

1. Сушко В. А. Релейная защита присоединений 6-35 кВ. Есть ли выход из тупика? / В. А. Сушко // Новости электротехники. – 2006. – № 4(40). – С. 33-35.

УДК 621.316.1.024

О.О. Мірошник, канд. техн. наук
Харківський національний технічний університет сільського господарства ім. П. Василенка, м. Харків, Україна

МЕТОД РОЗРАХУНКУ СИМЕТРИЧНИХ СКЛАДОВИХ НАПРУГ МЕРЕЖІ 0,38/0,22 кВ

Запропоновано матричний метод розрахунку симетричних складових напруги мережі 0,38/0,22 кВ, який може бути покладений в основу математичного апарату для розробки програмного продукту з розрахунку несиметрії напруг.

Постановка проблеми

Проблема поліпшення якості та зменшення додаткових втрат електричної енергії, викликаних відхиленням показників якості електричної енергії від допустимих значень, є актуальною в сільських електричних мережах напругою 0,38/0,22 кВ. Аналіз режимів роботи сільських мереж напругою 0,38/0,22 кВ [1] показав, що несиметрія струмів обумовлена роботою комунально-побутового навантаження, основну частину якого складають нерівномірно розподілені по фазах однофазні електроприймачі. Тому знання величини несиметрії в мережі дозволяє уточнити рівень втрат електроенергії та застосувати відповідні заходи щодо їх зниження. Сучасний рівень комп'ютерної техніки дозволяє в реальному часі виконувати обчислення цих втрат, тому виникає необхідність створити математичний апарат, який буде основою програмного продукту з розрахунку несиметрії в мережах 0,38/0,22 кВ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Розрахунок розподілу симетричних складових напруг розгалуженої сільської мережі 0,38/0,22 кВ досить складний. Обчислення параметрів всієї мережі або її частини до

розрахункової точки вкрай громіздке і пов'язане, як правило, з необхідністю виконання операцій з великою кількістю матриць. Тому рішення задачі за допомогою ручного рахунку навіть для відносно нескладних схем вимагає значних витрат праці і часу.

Мета статті

Визначити межі розподілу значень симетричних складових напруг мережі 0,38/0,22 кВ при несиметричному режимі навантаження.

Основні матеріали дослідження

Широке впровадження комп'ютерної техніки висуває вимогу розробки і застосування таких методів розрахунку, які, незважаючи на можливу громіздкість арифметичних операцій, були б достатньо простими при вирішенні задачі в загальному вигляді і давали б максимальну циклічність рахунку.

Виходячи з цього, розглянуто можливість застосування для вирішення цієї задачі методу вузлових потенціалів.

У загальному вигляді рівняння методу вузлових потенціалів у матричній формі має вигляд [2]:

$$\mathbf{YU} = \mathbf{I} \tag{1}$$

або

$$\begin{Vmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \dots & Y_{nn} \end{Vmatrix} \begin{Vmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \dots \\ U_n \end{Vmatrix} = \begin{Vmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \dots \\ I_n \end{Vmatrix}, \tag{2}$$

де **Y** – матриця вузлових провідностей;

U – вектор вузлових потенціалів;

I – вектор струмів незалежних еквівалентних вузлових джерел.

Матриці струмів та напруг у будь-якій точці мережі мають фазні значення [3, 4]:

$$\dot{\mathbf{U}} = \begin{Vmatrix} \dot{U}_a \\ \dot{U}_b \\ \dot{U}_c \end{Vmatrix}; \ \dot{\mathbf{I}} = \begin{Vmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{Vmatrix}. \tag{3}$$

У системі симетричних координат відповідні матриці струмів і напруг містять складові прямої, зворотної та нульової послідовностей:

$$\dot{\mathbf{U}}_\mathbf{s} = \begin{Vmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \\ \dot{U}_0 \end{Vmatrix}; \ \dot{\mathbf{I}}_\mathbf{s} = \begin{Vmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \dot{I}_0 \end{Vmatrix}. \tag{4}$$

З (2) напруга будь-якого вузла може бути отримана за правилом Крамера [3, 5]:

$$\dot{U}_к = \frac{1}{\Delta} \sum \Delta_{lк} \dot{U}_{ик} Y_{ик}, \tag{5}$$

де Δ – визначник **Y**-матриці провідностей;

$\Delta_{lк}$ – алгебраїчне доповнення елемента $\mathbf{Y_{lк}}$ матриці провідностей.

Елементи **Y**-матриці з однаковими індексами (*pp*), що стоять на перетині р-го рядка та *p*-го стовбця, являють собою провідності елементів схеми, які приєднані до вузла *p*. Елементи матриці з різними індексами (*pq*), що стоять на перетині *p*-го рядка та *q*-го

стовбця, являють собою провідності елементів схеми, що включені між вузлами *p* та *q*, і взяті з від'ємним знаком.

У разі одностороннього живлення відповідно отримаємо [3, 6]:

$$\dot{U}_к = \frac{1}{\Delta}\sum \Delta_{1к}\dot{U}_{uI}\,Y_{uI}\,. \qquad (6)$$

Відносна напруга у вузлі к:

$$\underset{*}{\dot{U}}_к = \frac{U_к}{U_{кI}} = \frac{\Delta_{1к}}{\Delta}Y_{uI}\,. \qquad (7)$$

Якщо мережа простої конфігурації, то матриця провідностей **Y** відносно легко записується шляхом попередньої побудови схем заміщення або графіків. У випадку мережі складної конфігурації стає доцільно процес запису матриці **Y** автоматизувати за допомогою комп'ютерних засобів. Ґрунтуючись на викладеному вище принципі запису елементів матриці, алгоритм передбачає формування її за заданими $Z_к = r_к + jx_к$ – опорами елементів мережі.

Опір прямої і нульової послідовностей трифазної лінії знаходиться розрахунковим або дослідним шляхом, причому опори прямої і зворотної послідовностей для ліній однакові, а опір нульової послідовності може в 2-3 рази перевищувати опір прямої послідовності. Пояснюється це різницею величин е.р.с. взаємної індукції, що наводяться у фазі струмами прямої та нульової послідовностей, які протікають за двома іншими фазами.

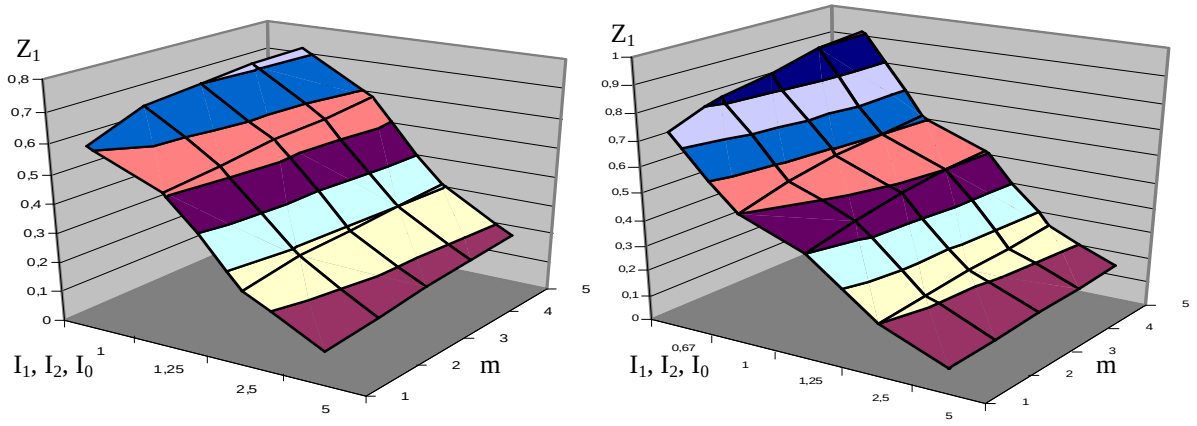
На рис. 1 показаний графік симетричних складових струмів для несиметричного режиму, коли

$$Z_A = Z \;\text{ і }\; Z_A = Z_C = \infty$$

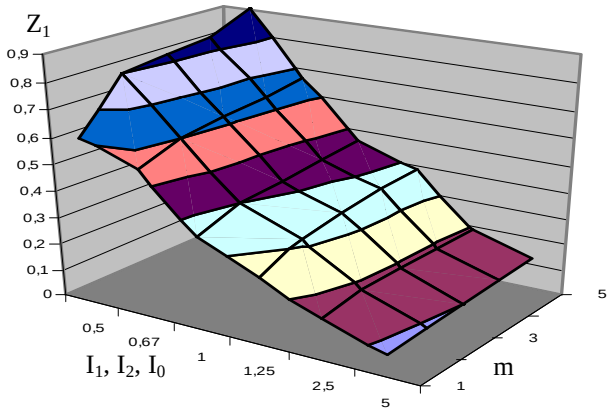
у функції

$$m = \frac{Z_{2\Sigma}}{Z_{1\Sigma}};\; n = \frac{Z_{2\Sigma}}{Z_{0\Sigma}} \;\text{ і }\; Z_{1\Sigma},$$

де $Z_{1\Sigma}$, $Z_{2\Sigma}$, $Z_{0\Sigma}$ – сумарні опори схем відповідно прямої, зворотної та нульової послідовностей.



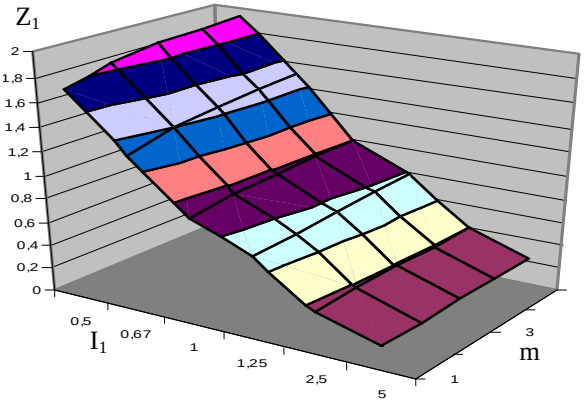
а) при n = 0,3 *б) при n = 0,5*



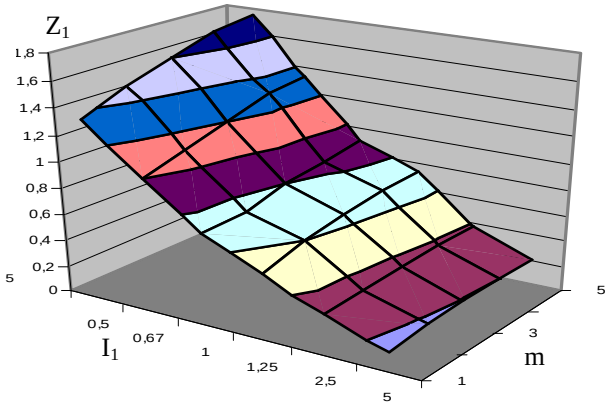
в) при n = 1

Рис. 1. Симетричні складові струмів у лінії в несиметричному режимі ($Z_A = Z$, $Z_B = Z_C = \infty$)

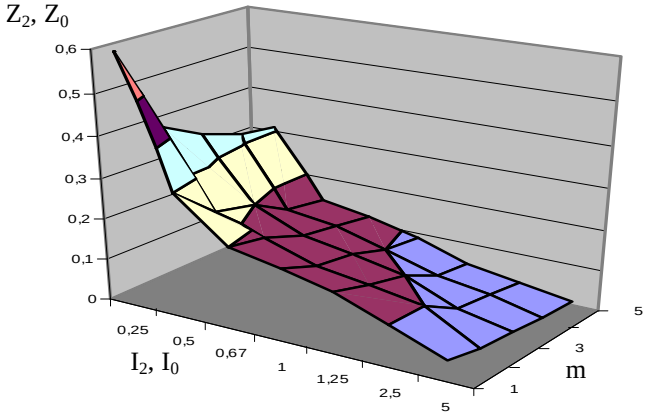
На рис. 2 показані графіки характеристик несиметричного режиму для випадку, коли $Z_A = \infty$ і $Z_B = Z_C$.



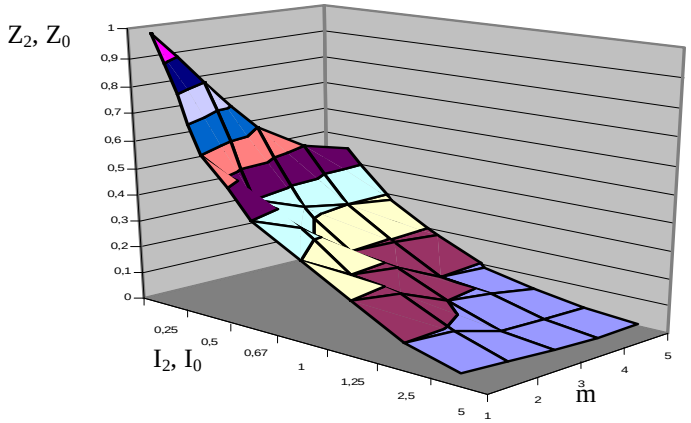
а) пряма послідовність (n = 0,3)



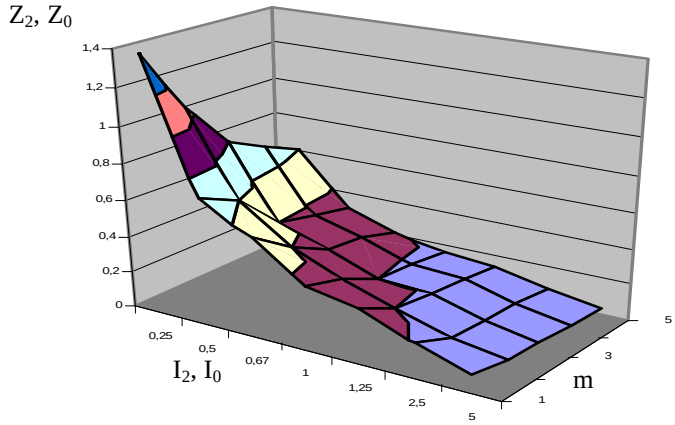
б) пряма послідовність (n = 1)



в) зворотня і нульова послідовності (n = 0,3)



г) зворотня і нульова послідовності (n = 0,7)



д) зворотня і нульова послідовності (n = 1)

Рис. 2. Симетричні складові струмів у лінії в несиметричному режимі ($Z_A = \infty$, $Z_B = Z_C$)

Висновки

Розроблений метод розрахунку розподілу симетричних складових напруги мережі 0,38/0,22 кВ може бути покладений в основу програмного продукту з розрахунку несиметричних режимів.

Список використаних джерел

1. Левин М. С. Анализ несимметричных режимов сельских сетей 0,38 кВ / М. С. Левин, Т. Б. Лещинская // Электричество. – 1999. – № 5. – С. 18-22.

2. Зевеке Г. В. Основы теории цепей: учеб. для вузов / Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин, А. В. Нетушил, С. В. Страхов. – 5-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.

3. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники: электрические цепи: учеб. для студентов электротехнических, энергетических и приборостроительных специальностей вузов / Л. А. Бессонов. – 7-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1978. – 528 с.

4. Солдаткина Л. А. Электрические сети и системы / Л. А. Солдаткина. – М.: Энергия, 1972. – 272 с.

5. Мельников Н. А. Расчеты режимов работы электрических сетей / Н. А. Мельников. – М.: Госэнергоиздат, 1950. – 175 с.

6. Веников В. А. Электрические системы. Электрические расчеты, программирование и оптимизация режимов / В. А. Веников, В. И. Горушкин, И. М. Маркович [и др.]; под ред. В. А. Веникова. – М.: Высш. школа, 1973. – 320 с.

УДК 621.311

В. М. Сулейманов, канд. техн. наук
В. А. Баженов, канд. техн. наук
Т. Л. Кацадзе, канд. техн. наук
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна

ОПТИМІЗАЦІЯ РОБОЧИХ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ СИСТЕМОУТВОРЮВАЛЬНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧ НАДВИСОКОЇ НОМІНАЛЬНОЇ НАПРУГИ

У роботі представлені розроблені математичні моделі та методи вибору оптимальних технічних заходів, направлених на зменшення втрат потужності в неоднорідній мережі вищих класів номінальної напруги та покращення техніко-економічних показників роботи енергооб'єднання України. Такі моделі враховують особливості передавання електричної енергії на дальні лінії електропередачі надвисокої номінальної напруги, до яких відносять системоутворюючі магістральні лінії 750 кВ. Розроблені математичні моделі та методи, орієнтовані на визначення оптимальних законів регулювання режиму напруги у вузлових точках мережі ліній, режиму реактивної потужності в лініях з метою мінімізації втрат активної потужності в мережі. Зокрема, розв'язані задачі роздільного та сумісного регулювання напруги та реактивної потужності в мережі дальніх ліній, які мають загальну вузлову точку, у тому числі і з урахуванням можливих наявних обмежень за реактивною потужністю.

Загальна характеристика задач оптимізації робочих режимів електричних систем

Енергетика України є базовою галуззю національної економіки, найважливішим фактором її розвитку. Очевидно, що стале функціонування та розвиток паливно-енергетичного комплексу визначає долю реформування енергетики та майбутнього України. На перспективу до 2030 р. в Об'єднаній енергосистемі (ОЕС) України зберігається стратегія розвитку живлячих електричних мереж, де системоутворюючі функції видачі потужності крупних електричних станцій та забезпечення паралельної роботи з енергетичними системами інших держав, як і раніше, залишається за електричними мережами 330 та 750 кВ при суттєвому зростанні частки мереж надвисокої номінальної напруги.

Для забезпечення сталої роботи ОЕС України, ефективного та повного використання потужностей генеруючої частини ОЕС України, дотримання нормативних умов видачі потужностей Хмельницької, Рівненської та Запорізької атомних електростанцій та регульованих потужностей гідроакумулюючих станцій, особливо Дністровської, необхідно в наміченій перспективі завершити формування двох транзитних магістралей 750 кВ – так званих південного (Хмельницька АЕС – Дністровська ГАЕС – ПС Приморська – ПС Каховська – Запорізька АЕС із загальною довжиною 1050 км) та північного (Рівненська АЕС – ПС Київська – ПС Північноукраїнська – ПС Харківська – ПС Донбаська із загальною довжиною 1200 км) поясів. Природно, що спорудження зазначених поясів з урахуванням заміни застарілого силового енергетичного обладнання, буде вимагати залучення значних інвестицій в енергетику України.

Проблема оптимізації робочих режимів електричних мереж надвисокої номінальної напруги, на відміну від електричних мереж більш низьких класів напруг, суттєво ускладнюється через дві обставини. По-перше, це необхідність урахування хвильового характеру електромагнітних процесів у передачах такого роду, а по-друге, – необхідність додаткового врахування особливостей процесів регулювання режимів напруги та реактивної потужності у загальних вузлових точках електропередач, які виникають внаслідок розвитку мережі надвисокої номінальної напруги на шинах підстанції 500-750 кВ.

На сьогодні практика моделювання робочих режимів електричних систем, зокрема розв'язання задач оптимізації таких режимів, базується на моделюванні ліній електропередач схемами заміщення із зосередженими параметрами. Це є допустимим при моделюванні ліній електропередачі невеликої довжини до 200-300 км. Але за наявності в електричній системі більш довгих ліній електропередач вимагає застосування спеціальних математичних моделей, які мають враховувати рівномірний розподіл параметрів вздовж довжини таких ліній та хвильові процеси при передаванні по лініях електричної енергії

внаслідок обмеженості швидкості розповсюдження електромагнітної хвилі вздовж ліній електропередач.

Наявність та подальший розвиток розвиненої мережі ліній електропередач 750 кВ в ОЕС України визначає неможливість застосування прийнятих традиційних методів аналізу та оптимізації робочих режимів електричних систем, оскільки застосування таких методів може призводити до істотної, інколи навіть недопустимої похибки отримуваних результатів. Тому традиційні математичні моделі не можуть бути використані в задачах вибору оптимальних режимів ОЕС України.

Електроенергетичні системи мають у своєму складі безліч різних елементів і підсистем та є дуже складними та великими регульованими системами. При цьому функціонування кожної підсистеми, кожного елемента визначається своїм одним або кількома критеріями при множині критеріїв функціонування самої системи.

У загальному випадку, при вирішенні завдання вибору економічно вигідного режиму роботи електропередачі, слід здійснювати багатофакторну оптимізацію режимних параметрів, яка полягає у визначенні найбільш вигідного розподілу активної потужності як між електричними станціями в поєднуваних електропередачею енергосистемах, так і між окремими агрегатами на кожній з електростанцій; оптимального розподілу реактивної потужності між її регульованими джерелами; максимального зниження ступеня електричної неоднорідності замкнутої мережі системи; сприятливого режиму напруги у вузлових точках електропередачі [1]. Комплексне рішення цієї задачі є складним і громіздким. Тому в більшості практичних випадків здійснюють оптимізацію режимів роботи електропередачі, орієнтуючись лише на деякі найбільш істотні параметри [2].

У статті розглянуто розв’язання задачі оптимізації режимів напруг та реактивної потужності в системоутворювальній мережі ОЕС України в експлуатаційній постановці задачі, орієнтованій на мінімізацію сумарних втрат активної потужності в мережі.

Особливості оптимізації режимів мереж дальніх ліній електропередач, які мають спільну вузлову точку

Розвиток електричних систем призвів до формування складнозамкненої електричної мережі надвисокої напруги, що виконує системоутворюючі функції в об’єднаній енергосистемі. У цих умовах задачу вибору оптимального режиму роботи енергооб’єднання необхідно розв’язувати не для кожної лінії окремо, а для всієї електричної мережі надвисокої напруги в цілому. Важливо також враховувати, що з розвитком високовольтних ліній електропередач все більше число їх виявляється пов’язаним у вузлових точках – на шинах підстанцій 500-750 кВ.

Втрати активної потужності в лініях електропередачі зазвичай поділяють на два класи:

1) втрати енергії на іонізацію повітря навколо проводів повітряної лінії (втрати на корону). Такі втрати визначаються робочою напругою та кліматичними умовами в районі траси лінії і мають місце протягом всього періоду, коли лінія знаходиться під напругою;

2) втрати на розсіювання теплової енергії, яка виділяється внаслідок протікання робочих струмів навантаження по фазних проводах лінії. Такі втрати мають місце протягом часу, коли лінія знаходиться під навантаженням.

Для визначення втрат активної потужності в магістральних лініях електропередачі використано математичну модель лінії з розподіленими параметрами, у вигляді пасивного чотириполюсника [3, 4]:

$$\begin{cases} \dot{U}_2 = \underline{D}U_1 - \underline{B}\dfrac{\dot{S}_1}{U_1}; \\ \dot{I}_2 = -\underline{C}U_1 + \underline{A}\dfrac{\dot{S}_1}{U_1}, \end{cases} \qquad (1)$$

де U_1, U_2, I_1, I_2, S_1, S_2 – напруга, струм та повна потужність на початку та наприкінці лінії відповідно; індекси «1» та «2» визначають параметри на початку та наприкінці електропередачі; A, B, C, D – узагальнені сталі еквівалентного чотириполюсника.

Вираз для визначення сумарних втрат активної потужності у всіх лініях електропередачі, суміжних із заданою вузловою точкою, який враховує хвильові параметри дальніх електропередач, має вигляд:

$$\Delta P_{\Sigma} = U^2 \sum_{i=1}^{m} a_{iU} + \frac{1}{U^2} \sum_{i=1}^{m} a_{iI} \left(P_i^2 + Q_i^2 \right) + \sum_{i=1}^{m} a_{iP} P_i + \sum_{i=1}^{m} a_{iQ} Q_i \,, \qquad (2)$$

де a_{iU} – коефіцієнт втрат активної потужності за неробочого ходу i-ї лінії; a_{iI} – коефіцієнт втрат активної потужності в режимі навантаження i-ї електропередачі; a_{iP}, a_{iQ} – коефіцієнти втрат активної потужності за передачі по i-й лінії тільки активної та тільки реактивної потужності відповідно.

Коефіцієнти втрат активної потужності за умовами початку лінії визначають за виразами [3, 4]:

$$a_U = C'D' + C''D'';$$
$$a_I = A'B' + A''B'';$$
$$a_P = -2\left[B'C' + A''D''\right];$$
$$a_Q = 2\left[B''C' - A'D''\right],$$

де штрихом позначена дійсна, а двома штрихами – уявна складова узагальнених сталих еквівалентного чотириполюсника моделі лінії електропередач.

Зазначимо, що при заданій постановці задачі всі електропередачі, які відходять від вузлової точки, розглядають як ті, що розраховують за умовами початку.

Метою оптимізації режиму є визначення напруги на шинах вузлової підстанції і потоку реактивної потужності на початку кожної з ліній, які забезпечують мінімум сумарних втрат активної потужності в усіх суміжних лініях. Тут, залежно від вихідних умов, принципово можна виокремити п’ять різних підходів до оптимального регулювання напруги і реактивних потужностей у вузлових точках електричної мережі:

1) оптимальне регулювання напруги у вузловій точці за заданих реактивних потужностей в усіх лініях;

2) оптимальне регулювання реактивних потужностей в усіх суміжних лініях за фіксованого значення напруги у вузловій точці;

3) оптимальне сумісне регулювання режимів напруги та реактивної потужності;

4) оптимальне регулювання режиму реактивної потужності у суміжних лініях за фіксованого значення напруги у вузловій точці та наявних обмежень за реактивною потужністю;

5) оптимальне сумісне регулювання режимів напруги та реактивної потужності за наявних обмежень за реактивною потужністю.

Нижче розглянуті методологічні підходи до розв’язання таких оптимізаційних задач.

Оптимальне регулювання напруги за фіксованих реактивних потужностей дальніх ліній електропередач, які мають спільну вузлову точку

Розглянемо задачу оптимального регулювання рівня напруги у вузловій точці при заданих реактивних потужностях в усіх лініях, що відходять від заданої вузлової точки. Зазвичай таку задачу розв’язують у разі, коли у всіх суміжних лініях реактивну потужність можна визначати заданим бажаним коефіцієнтом потужності у всіх можливих режимах електропередачі. Очевидно, що в такій ситуації оптимізації підлягає лише напруга на шинах вузлової підстанції. Її можна визначити, розв’язавши рівняння вигляду $\partial \Delta P_{\Sigma} / \partial U = 0$, де $\partial \Delta P_{\Sigma} / \partial U$ – частинна похідна від сумарних втрат потужності за напругою у вузловій точці:

$$\frac{\partial \Delta P_{\Sigma}}{\partial U} = 2U \sum_{i=1}^{m} a_{iU} - \frac{2}{U^3} \sum_{i=1}^{m} a_{iI} \left(P_i^2 + Q_i^2 \right) = 0 .$$

Звідки оптимальна напруга на шинах опорної вузлової підстанції визначається виразом:

$$U_{\text{o}} = \sqrt[4]{\frac{\sum_{i=1}^{m} a_{iI} \left(P_i^2 + Q_i^2 \right)}{\sum_{i=1}^{m} a_{iU}}} . \qquad (3)$$

Аналіз виразу (3) свідчить про те, що оптимальне значення напруги на шинах вузлової підстанції визначається параметрами всіх суміжних ліній та їх навантаженнями активною та реактивною потужностями.

Оптимальне регулювання режиму реактивних потужностей за фіксованої напруги в опорному вузлі

Розглянемо розв'язання задачі оптимального регулювання реактивних потужностей у всіх лініях, що відходять від вузла, за фіксованого значення напруги на шинах вузлової підстанції. Таку задачу зазвичай розв'язують у ситуації, коли вузлова підстанція не обладнана засобами регулювання напруги або коли за наявності таких засобів у процесі ведення режиму електропередачі була досягнута межа регулювання. Отже, оптимізації підлягає тільки режим реактивної потужності у всіх суміжних лініях електропередачі.

Оптимальне значення реактивної потужності, яка супроводжує транзит активної потужності в кожній з ліній, можна визначити на підставі розв'язання низки рівнянь вигляду $\partial \Delta P_{\Sigma} / \partial Q_i = 0$, де $\partial \Delta P_{\Sigma} / \partial Q_i$ – частинна похідна від сумарних втрат активної потужності за реактивною потужністю в *i*-й лінії. Сумісне розв'язання рівнянь цього типу визначає значення реактивної потужності в кожній із суміжних ліній, які забезпечують мінімум сумарних втрат активної потужності:

$$\frac{\partial \Delta P_{\Sigma}}{\partial Q_i} = \frac{2a_{iI}}{U^2} Q_i + a_{i\text{Q}} = 0 ,$$

звідки оптимальне навантаження реактивною потужністю *i*-ї лінії визначається виразом:

$$Q_{i\text{o}} = -U^2 \frac{a_{i\text{Q}}}{2a_{iI}} . \qquad (4)$$

Аналіз виразу (4) свідчить, що оптимальне значення реактивної потужності *i*-ї гілки не залежить від параметрів суміжних ліній і транзиту активної потужності по лінії, а отже, його можна визначити лише за напругою на шинах вузлової підстанції. Зазначимо, що оптимальний режим реактивної потужності в кожній з ліній завжди має ємнісний характер. Тобто, незалежно від режиму передавання по лінії активної потужності, найбільш оптимальною буде організація приймання з ліній їх ємнісної зарядної потужності.

Сумісне оптимальне регулювання режиму напруги в опорному вузлі та реактивних потужностей суміжних ліній

Розглянемо задачу сумісного оптимального регулювання режимів напруги на шинах вузлової підстанції та реактивних потужностей у всіх суміжних лініях. Тут необхідно організувати спільне розв'язання рівнянь виду $\partial \Delta P_{\Sigma} / \partial U = 0$ та $\partial \Delta P_{\Sigma} / \partial Q_i = 0$ для кожної суміжної лінії, де $\partial \Delta P_{\Sigma} / \partial U$ та $\partial \Delta P_{\Sigma} / \partial Q_i$ – частинні похідні від сумарних втрат потужності за напругою в опорному вузлі та реактивної потужності *i*-ї лінії відповідно. Така задача є поєднанням двох попередніх.

Для оптимізаційної задачі з урахуванням хвильових параметрів ліній електропередач тут необхідно організувати спільне розв'язання рівнянь (3) і (4), записаних для всіх ліній. У результаті оптимальне значення напруги на шинах вузлової підстанції визначають за виразом:

$$U_{\text{o}} = \sqrt[4]{4\sum_{i=1}^{m} a_{iI} P_i^2 \Big/ \sum_{i=1}^{m}\left(4a_{iU} - \frac{a_{iQ}}{a_{iI}}\right)}\,.$$

Оптимальне значення реактивної потужності в *i*-й лінії знаходять за рівнянням:

$$Q_{i\,\text{o}} = -\frac{a_{iQ}}{a_{iI}}\sqrt{\sum_{i=1}^{m} a_{iU} P_i^2 \Big/ \sum_{i=1}^{m}\left(4a_{iU} - \frac{a_{iQ}}{a_{iI}}\right)}\,.$$

Оптимальний розподіл наявної реактивної потужності за фіксованої напруги в опорному вузлі

Таку задачу розв'язують у випадку, коли шуканий оптимальний режим реактивної потужності не може бути реалізований через обмеження реактивної потужності в розглянутому вузлі схеми. Це потребує додаткового дотримання всіх можливих режимів суміжних ліній електропередачі умови балансу реактивної потужності на шинах вузлової підстанції електричної системи:

$$\sum_{i=1}^{m} Q_i = Q_{\text{к.п.}}\,, \tag{5}$$

де $Q_{\text{к.п}}$ – наявна реактивна потужність компенсувальних пристроїв вузлової підстанції (у тому числі генераторів електростанцій).

Розв'язання задачі полягає в такому розподілі наявної реактивної потужності вузла між суміжними лініями, щоб сумарні втрати активної потужності у всіх лініях характеризувалися відносними мінімумами.

Для розв'язання цієї задачі доцільно скористатися методом Лагранжа. За умови урахування хвильових параметрів дальніх ліній електропередач функцію Лагранжа можна подати у вигляді:

$$\Phi = U^2 \sum_{i=1}^{m} a_{iU} + \frac{1}{U^2}\sum_{i=1}^{m} a_{iI}\left(P_i^2 + Q_i^2\right) + \sum_{i=1}^{m} a_{iP} P_i + \sum_{i=1}^{m} a_{iQ} Q_i + \lambda\left(\sum_{i=1}^{m} Q_i - Q_{\text{к.п}}\right),$$

де λ – невизначений множник Лагранжа.

Частинні похідні від функції Лагранжа за реактивною потужністю кожної з ліній мають вигляд:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial Q_i} = \frac{2Q_i a_{iI}}{U^2} + a_{iQ} + \lambda\,. \tag{6}$$

Нульові значення частинних похідних (6), доповнені рівнянням балансу реактивної потужності (5), утворюють систему рівнянь, кількість яких на одиницю більша від кількості ліній. Невідомими в цих рівняннях є потоки реактивної потужності в лініях Q_i і невизначений множник Лагранжа λ, що свідчить про можливість розв'язання такої системи алгебричних рівнянь:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial \Phi}{\partial Q_1} = \dfrac{2Q_1 a_{1I}}{U^2} + a_{1Q} + \lambda = 0; \\ \dfrac{\partial \Phi}{\partial Q_2} = \dfrac{2Q_2 a_{2I}}{U^2} + a_{2Q} + \lambda = 0; \\ \ldots \\ \sum\limits_{i=1}^{m} Q_i - Q_{\text{к.п}} = 0. \end{cases} \tag{7}$$

Розв'язання системи рівнянь (7) дозволяє визначити оптимальну реактивну потужність кожної з ліній:

$$Q_i = \frac{Q_{\text{к.п}}}{a_{iI}\sum\limits_{j=1}^{m} 1/a_{jI}} - \frac{U^2}{2}\,\frac{\sum\limits_{j=1}^{m}\left(a_{iQ} - a_{jQ}\right)/a_{jI}}{a_{iI}\sum\limits_{j=1}^{m} 1/a_{jI}}\,. \tag{8}$$

Аналіз виразу (8) показує, що оптимальна реактивна потужність кожної з ліній містить дві складові. Перша з них являє собою частину наявної реактивної потужності вузлової підстанції, що спрямована в поточну *i*-ту лінію, яка завжди має ємнісний характер, незалежно від режиму активної потужності в лінії. Друга складова не залежить від наявної реактивної потужності та її визначають лише за значенням напруги на шинах підстанції і відмінністю параметрів суміжних ліній. Ця складова може мати як ємнісний, так і індуктивний характер. Природно, алгебрична сума цих складових для всіх суміжних ліній завжди дорівнює нулю.

Отже, для мінімізації втрат активної потужності в лініях навіть без реактивної потужності у вузловій точці схеми доцільно завантажувати лінії різною за знаком реактивною потужністю, а для більш дальніх ліній організовувати приймання частини їх зарядних ємнісних потужностей через завантаження коротших ліній індуктивною потужністю. Це призводить до певного збільшення втрат активної потужності в більш коротких лініях, але й одночасно до істотного зниження втрат активної потужності в довших лініях.

В окремому випадку, коли всі суміжні лінії мають однакові параметри, наявна реактивна потужність розподіляється між лініями порівно, а складова, зумовлена неоднорідністю параметрів лінії, дорівнює нулю.

Оптимальний розподіл наявної реактивної потужності за сумісного регулювання напруги в опорному вузлі

Для розв’язання такої задачі систему рівнянь (7) слід доповнити рівнянням (3). Сумісним розв’язанням отриманої системи рівнянь можна визначити оптимальний розподіл наявної реактивної потужності пристроїв компенсації загального вузла мережі між суміжними лініями електропередачі й оптимальне значення напруги у вузловій точці, що забезпечує відносний мінімум сумарних втрат активної потужності у всіх лініях.

Розв’язуючи поставлену задачу, слід врахувати той факт, що наявна у вузлі реактивна потужність у загальному випадку має дві складові: реактивні потужності регульованих ($Q_{\text{р}}$) і нерегульованих ($Q_{\text{н.р}}$) пристроїв компенсації. Для регульованих компенсувальних пристроїв, наприклад, синхронних компенсаторів, реактивна потужність не залежить від значення напруги на шинах вузлової підстанції і визначається лише законом регулювання реактивної потужності. Навпаки, реактивна потужність нерегульованих компенсувальних пристроїв, наприклад, шунтувальних реакторів, визначається квадратом напруги на їх затискачах. Отже, наявна реактивна потужність загального вузла схеми така:

$$Q_{\text{к.п}} = Q_{\text{р}} + b_{\text{н.р}} U^2 . \qquad (9)$$

Вираз (9) потрібно включати до складу системи рівнянь, яка визначає оптимальні параметри режиму ліній електропередачі. У цьому разі останнє рівняння системи (7) набуває вигляду:

$$\sum_{i=1}^{m} Q_i - Q_{\text{р}} - b_{\text{н.р}} U^2 = 0$$

У результаті перетворення системи рівнянь вигляду

$$\begin{cases} \dfrac{\partial \Phi}{\partial Q_1} = \dfrac{2Q_1 a_{1I}}{U} + a_{1Q} + \lambda = 0; \\ \dfrac{\partial \Phi}{\partial Q_2} = \dfrac{2Q_2 a_{2I}}{U} + a_{2Q} + \lambda = 0; \\ \ldots \\ \sum\limits_{i=1}^{m} Q_i - Q_{\text{р}} - b_{\text{н.р}} U^2 = 0; \\ U^4 \sum\limits_{i=1}^{m} a_{iU} - \sum\limits_{i=1}^{m} a_{iI} \left(P_i^2 + Q_i^2 \right) = 0 \end{cases}$$

отримуємо біквадратне рівняння, розв’язання якого визначає оптимальне значення напруги на шинах вузлової підстанції:

$$U_{\text{o}}^4\left[\sum_{i=1}^{m}a_{iU}-\frac{\sum\limits_{i=1}^{m}\left(\sum\limits_{j=1}^{m}\left(a_{iQ}-a_{jQ}\right)/a_{jI}\right)^2\Big/a_{iI}}{4\left(\sum\limits_{i=1}^{m}1/a_{iI}\right)^2}-\frac{b_{\text{н.р}}^2}{\sum\limits_{i=1}^{m}1/a_{iI}}\right]+U_{\text{o}}^2\left[\frac{2b_{\text{н.р}}^2Q_{\text{р}}}{\sum\limits_{i=1}^{m}1/a_{iI}}\right]-\frac{Q_{\text{р}}^2}{\sum\limits_{i=1}^{m}1/a_{iI}}-\sum_{i=1}^{m}P_i^2a_{iI}=0. \quad (10)$$

У рівнянні (10) фізичний зміст має більший за модулем додатний корінь.

Якщо на підстанції немає нерегульованих компенсувальних пристроїв ($b_{\text{н.р}}=0$), вираз (10) спрощується, а оптимальне значення напруги можна визначити за виразом:

$$U_{\text{o}}=\sqrt[4]{\frac{\dfrac{Q_{\text{р}}^2}{\sum\limits_{i=1}^{m}1/a_{iI}}+\sum\limits_{i=1}^{m}P_i^2a_{iI}}{\sum\limits_{i=1}^{m}a_{iU}-\dfrac{\sum\limits_{i=1}^{m}\left(\sum\limits_{j=1}^{m}\left(a_{iQ}-a_{jQ}\right)/a_{jI}\right)^2\Big/a_{iI}}{4\left(\sum\limits_{i=1}^{m}1/a_{iI}\right)^2}}}. \quad (11)$$

Якщо підстанцію не обладнано регульованими пристроями компенсації і використовуються тільки нерегульовані, то рівняння для оптимального значення напруги на шинах вузлової підстанції набуває вигляду:

$$U_{\text{o}}=\sqrt[4]{\frac{\sum\limits_{i=1}^{m}P_i^2a_{iI}}{\sum\limits_{i=1}^{m}a_{iU}-\dfrac{\sum\limits_{i=1}^{m}\left(\sum\limits_{j=1}^{m}\left(a_{iQ}-a_{jQ}\right)/a_{jI}\right)^2\Big/a_{\text{ік.з}}}{4\left(\sum\limits_{i=1}^{m}1/a_{iI}\right)^2}-\dfrac{b_{\text{н.р}}^2}{\sum\limits_{i=1}^{m}1/a_{iI}}}}. \quad (12)$$

Для визначення реактивної потужності на початку кожної з ліній треба скористатися виразом (8) з урахуванням значення оптимального значення напруги на шинах вузлової підстанції, знайденого зі співвідношень (10)-(12), відповідно до складу пристроїв компенсації на підстанції.

Дослідження законів оптимального регулювання режиму напруги та реактивних потужностей Південноукраїнської АЕС та підстанції Київська-750

Розроблені математичні моделі оптимізації робочих режимів магістральних електричних мереж протяжних ліній електропередач, протестовані під час проведення розрахункового експерименту для фрагментів мережі 750 кВ ОЕС України, зокрема для вузлів підстанції Київська-750 та Південноукраїнської АЕС (ПУАЕС) з урахуванням перспективного розвитку мережі магістральних ліній напругою 750 кВ. Тут для шин розподільчого пристрою 750 кВ розглянуто розв'язання оптимізаційних задач для трьох ліній електропередачі: ПУАЕС – підстанція Вінницька; ПУАЕС – підстанція Дніпровська; ПУАЕС – Ісакча. Для енерговузла підстанції Київська розглянуто перспективну схему, яка містить існуючу лінію ПС Київська – ПС Вінницька, та перспективні лінії ПС Київська – Хмельницька АЕС, ПС Київська – Рівненська АЕС (введення в експлуатацію у 2012 р.) та лінію ПС Київська – ПС Північноукраїнська (введення в експлуатацію у 2020 р.).

Проведені розрахунки показали, що використання хвильових параметрів ліній електропередач у задачах оптимізації режимів напруги та реактивної потужності в електричній мережі дозволяє ввести режим напруги в область оптимального регулювання та знизити сумарні втрати активної потужності в мережі ліній електропередач, поєднаних у вузловій точці.

Висновки

1. На сьогодні у вітчизняній практиці відсутній математичний апарат, призначений для оптимізації робочих режимів мереж системоутворюючих магістральних ліній електропередач.

2. У роботі проведена розробка математичних моделей оптимізації робочих режимів мереж системоутворюючих ліній електропередач, які мають спільну вузлову точку з урахуванням можливих технологічних обмежень.

3. Розрахунковий експеримент підтвердив ефективність використання запропонованих оптимізаційних моделей порівняно з моделями, які не враховують хвильові процеси в дальніх лініях електропередачі.

4. Запропоновані математичні моделі та методологічні підходи до визначення оптимальних режимів напруги та реактивної потужності вимагають обов'язкового врахування хвильових процесів передавання електричної енергії по лініям надвисокої номінальної напруги та характеризуються високою надійністю та ефективністю.

Список використаних джерел

1. Вибір оптимальних схем побудови та режимів електроенергетичних систем на основі багатокритеріального аналізу: звіт про НДР 0108U002101 / В. М. Сулейманов, В. А. Баженов, Т. Л. Кацадзе. – Київ, 2008. – 128 с.

2. Экономия энергии в электрических сетях / И. И. Магда, С. Я. Меженный, В. Н. Сулейманов [и др.]; под ред. Н. А. Качановой и Ю. В. Щербины. – К.: Техніка, 1986. – 167 с.

3. Сулейманов В. М. Електричні мережі та системи: підруч. / В. М. Сулейманов, Т. Л. Кацадзе. – К.: НТУУ «КПІ», 2008. – 456 с.

4. Холмский В. Г. Расчет и оптимизация режимов электрических сетей (специальные вопросы) / В. Г. Холмский. – М.: Высш. шк., 1975. – 280 с.

УДК 621.311

В.В. Назаров, д-р техн. наук
ПАТ «Хмельницькобленерго»

С.Б. Масловський, заступник технічного директора
ПАТ «Укрелектроапарат»

ЕНЕРГОЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ РОЗПОДІЛЬНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

Проаналізовано переваги та недоліки існуючих розподільних трансформаторів та запропоновано нову конструкцію трансформаторів зі схемою Y/Δ/Y-0. Підготовлено до випуску серію трансформаторів потужністю 63-1600 кВА напругою 10(6) кВ, яка відповідає стандартам EN 60076, EN 50464-1.

Сьогодні постійно постає питання, яке пов'язане з розвитком електричних мереж та впровадженням енергоефективного обладнання в енергетиці України.

На цей час закупівля, включно й через тендери, нових силових розподільних трансформаторів проводиться з врахуванням, практично, лише ціни конкретного трансформатора. Спроби застосувати європейську формулу для визначення повної ціни трансформатора з додатком у вигляді капіталізованої вартості втрат енергії в трансформаторі не дають позитивних результатів з причини віртуальності так визначеної економічної ефективності та відсутності наочної оцінки фінансових втрат експлуатуючої організації за час використання трансформатора, який має меншу закупівельну ціну, але вищі втрати енергії у порівнянні з дорожчим трансформатором кращої якості та з меншими втратами.

Тому для порівняння повної ціни (C_n) (закупівельна ціна (C_m) плюс ціна втрат енергії за певний період часу) трансформаторів, які подані до придбання, доцільно враховувати вартість втрат енергії в трансформаторах (A) за нормативний час (6,7 року) та за час його експлуатації (25 років):

$$C_n = C_m + A;$$

$$A = \left(P_{xx} \cdot 8760 + P_{к.з.} \cdot \left(\frac{S_м}{S_н} \right)^2 \cdot \tau \right) \cdot \frac{c + c \cdot (1 + \Delta c)^t}{2} \cdot t,$$

де C_m – закупівельна ціна трансформатора, грн;

P_{xx} – втрати потужності холостого ходу, кВт;

8760 – кількість годин у році;

$P_{к.з.}$ – втрати потужності короткого замикання, кВт;

$S_м$ – максимальне навантаження трансформатора, кВА;

$S_н$ – номінальна потужність трансформатора, кВА;

τ – час втрат, годин;

c – ціна однієї кВт*год у першому році експлуатації, грн;

Δc – щорічне відносне зростання ціни однієї кВт*год;

t_1 – 6,7 року *=1/Кн*, *Кн* – нормативний коефіцієнт ефективності капіталовкладень (0,15).

Прийнявши ряд допущень, коректних для подальших порівнянь повної ціни трансформаторів, а саме :

$$S_м - 0{,}7 S_н;\ \tau - 1500 - 2000(1750) \text{ годин};\ \Delta c - 0{,}05,$$

маємо:

для $t_1 = 6{,}7$ років

$$A_{6,7} = 8 \cdot c \cdot (8760 \cdot P_{xx} + 850 \cdot P_{к.з.}),$$

для $t_2 = 25$ років

$$A_{25} = 55 \cdot c \cdot (8760 \cdot P_{xx} + 850 \cdot P_{к.з.}).$$

Обчисливши різницю $A_{6,7}$ та A_{25} для трансформаторів з різними втратами енергії та порівнявши їх з різницею ціни трансформаторів, покупець зможе об'єктивно оцінити вигоду трансформатора кращої якості та збитки, які очікують у процесі експлуатації дешевшого трансформатора, але з більшими втратами енергії.

При цьому необхідні заходи щодо упередження появи недостовірних даних про втрати енергії у паспортах трансформаторів та, особливо, у тендерній документації. До таких заходів слід віднести обов'язкову перевірку (повторне вимірювання за участю покупця) незалежною атестованою лабораторією названих вище параметрів з наступними жорсткими санкціями до постачальника трансформаторів з реальними втратами енергії, вищими від зазначених у паспортних та тендерних даних.

З причини низького завантаження розподільних трансформаторів 6(10)/0,4 кВ у більшості енергопостачальних компаній ($S_м$ не вище 0,35) у співвідношенні двох видів втрат превалююче значення набувають втрати холостого ходу – коефіцієнт при P_{xx} у формулах для розрахунку A залишається той же (8760), а коефіцієнт при $P_{к.з.}$ зменшується до 215. Крім того, величина P_{xx} трансформаторів випуску до 1980 року, а таких у нас, орієнтовно, половина від загальної кількості, перевищує величину P_{xx} сучасних трансформаторів у 1,5-2 рази. Для прикладу, залишивши в експлуатації морально застарілий трансформатор потужністю 250 кВА, за наступні 25 років (фізично при таких навантаженнях процеси старіння ізоляції суттєво сповільнюються) матимемо ціну втрат енергії по холостому ходу приблизно 400 тис. грн. Для сучасного енергоефективного трансформатора такої ж потужності ця величина не перевищує 250 тис. грн.

Які ж сучасні енергоефективні трансформатори може запропонувати ПАТ «Укрелектроапарат» до використання у загальнопромислових, міських та сільських мережах? Го-

ловну позицію тут займає розподільний силовий трансформатор 10(6) кВ з симетрувальною обмоткою, причому не тільки у класі потужності до 250 кВА, а й 400-1600 кВА.

Вирішуючи завдання оптимізації характеристик силових трансформаторів, у першу чергу, варто враховувати параметри, що визначають ефективність як їхнього виробництва, так і експлуатації в розподільних мережах. До таких параметрів, зокрема, відноситься опір нульової послідовності (Z0).

З можливих варіантів груп з'єднань обмоток (від яких і залежить Z0) силових трансформаторів 10(6)/0,4 кВ, в основному, застосовуються: зірка-зірка з нулем і трикутник-зірка з нулем. Іноді використовується зірка-зигзаґ з нулем. Переваги й недоліки цих з'єднань обмоток трансформаторів загальновідомі. Їхній аналіз підтверджує висновок про те, що за інтегральною (комплексною) оцінкою, у загальному випадку, трансформатор з тією або іншою групою з'єднань має свою "нішу" застосування і, певною мірою, задовольняє умови експлуатації в конкретній електроустановці.

Найбільш простим у виготовленні та надійним в експлуатації визнаний трансформатор із групою Y/Y-0. Але при цьому діючими й донині нормативними документами рекомендується (потрібно) обмежувати струм у нульовому проводі обмотки 0,4 кВ величиною 25 % від його номінального струму через відносно більші значення саме опору нульової послідовності таких трансформаторів. Крім того, асиметрія фазних навантажень є причиною так званих "перекосів" фазних напруг уже на виводах даних трансформаторів. Зменшити асиметрію фазних напруг можливо за рахунок включення між нульовим виводом обмотки 0,4 кВ та "землею" симетруючих пристроїв. Однак у такому випадку порушується найважливіша вимога ПУЕ – необхідність глухого заземлення нейтралі цієї обмотки.

Крім перерахованих вище груп з'єднання силових трансформаторів, є ще один варіант: доповнення трансформатора Y/Y-0 третьою обмоткою, з'єднаною в трикутник. Незважаючи на те, що такий спосіб поліпшення характеристик силових трансформаторів щодо опори нульової послідовності відомий, мабуть, із часів створення техніки передачі електроенергії, для розподільних силових трансформаторів потужністю 63-1600 кВА він практично не застосовується. І як виявляється – дарма.

Оптимізація конструктивних параметрів додаткової, з'єднаної в трикутник, обмотки розподільного силового трансформатора, розташування її безпосередньо на ізоляційному циліндрі обмотки НН, тобто – ближче до стержнів магнітопроводу, дозволяє конструктивно спростити трансформатор, зменшити витрати матеріалів і праці на виготовлення його обмоток у порівнянні з аналогами Δ/Y-0 і Y/Z-0. Крім того, Zo такого трансформатора в 1,5-2 рази вище, ніж в аналога Y/Z-0, але в 12-15 разів менше, ніж Y/Y-0, що, з однієї сторони, сприяє підвищенню зносостійкості комутаційних апаратів при відключеннях струмів однофазних коротких замикань, а з іншого – практично повністю забезпечує надійність та селективність відключення ушкодженої лінії в зазначених аварійних режимах мережі.

Завод "ПАТ Укрелектроапарат" підготував до випуску серію, яка відповідає стандартам EN 60076, EN 50464-1=2007 силових із симетруючою обмоткою трансформаторів ТМГСО власної розробки потужністю 63-1600 кВА напругою 10(6) кВ, призначених для застосування в загальнопромислових, міських і сільських мережах. Трансформатор зберігає в собі переваги схеми з'єднання Y/Y-0, значно зменшуючи асиметрію напруг при нерівномірному навантаженні фаз на стороні 0,4 кВ, забезпечуючи умови надійного спрацювання пристроїв захисту від однофазних коротких замикань у мережі 0,4 кВ. Виводи симетруючої обмотки, з'єднаної в трикутник, як і нейтраль первинної обмотки, на вимогу замовника можуть бути виведені на кришку бака для додаткового відбору потужності (до 10 % від номінальної потужності трансформатора) з метою живлення споживачів у системі 220 В з ізольованої нейтраллю.

Трансформатор ТМГСО може бути використаний також для живлення власних потреб підстанцій 110(35)/10(6) кВ у схемах живлення пристроїв релейного захисту й автоматики.

Висновки

З огляду на техніко-економічну й соціальну важливість завдань підвищення енергоефективності експлуатації електротехнічного устаткування, вже найближчим часом можна задовольнити потребу енергопостачальних підприємств у силових трансформаторах зі схемою Y/Δ/Y-0, виключивши виробництво трансформаторів Δ/Y-0 і Y/Z-0.

Список використаних джерел

1. Вольдек А. И. Электрические машины / А. И. Вольдек. – Л.: Энергия, 1974. – 840с.
2. EN 60076-2:2011 Power transformers. Temperature rise for liquid-immersed transformers.
3. EN 50464-1:2007 Standard and oil immersed transformer losses.

УДК 621.311

С. Н. Семененко, инженер
Торговый дом «ЭЛВО-Украина», г. Киев, Украина

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ, БЕЗОПАСНОСТИ И УДОБСТВА ОБСЛУЖИВАНИЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ 6(10) кВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРВТ-10 кВ

С целью повышения надежности, безопасности и удобства обслуживания распределительных сетей напряжением 6(10) кВ обосновано использование предохранителя-разъединителя выхлопного ПРВТ-10.

Постановка проблемы

Возрастающие требования потребителей к качеству поставляемой электроэнергии, предъявляет повышенные требования к распределительным устройствам и их компонентам. Отличительными особенностями, оказавшими влияние на состояние распределительных сетей Украины настоящего времени, стали отсутствие единой технической политики эксплуатирующих организаций, которая бы определяла идеологию построения сетей 6-20 кВ и отсутствие опыта проектирования сетей нового поколения. В то же время, энергокомпаниям необходимо учитывать современные требования к оборудованию сетей 6-20 кВ и внедрять новые технологии, позволяющие достичь снижения удельной затраты и повысить эксплуатационные характеристики сети.

Поэтому к оборудованию распределительных сетей предъявляются жесткие требования:

- высокая надежность работы;
- простота в управлении и безопасность в обслуживании;
- отсутствие или минимум ремонтов;
- разнообразие типоисполнений;
- разумное соотношения цены и эксплуатационных характеристик;
- обеспечение показателей качества и надежности электроснабжения потребителей.

В условиях реформирования энергетической отрасли и перехода сетевых компаний на рыночные отношения объективно назревает угроза выставления исковых требований к предприятиям облэнерго со стороны потребителя за неудовлетворительные показатели качества и за объемы недопоставленной электроэнергии.

Анализ публикаций

Более 100 лет тому назад был создан первый предохранитель и до сих пор не создан более надежный и наиболее широко применяемый коммутационный аппарат. Этот феномен объясняется тем, что плавкий элемент совмещает в себе функцию релейной автоматики и своего рода привод. Длительный неполнофазный режим работы электро-

оборудования при срабатывании предохранителя обычно исключается путем отключения нагрузки на вторичной стороне силового трансформатора.

Плавкие предохранители ПК(Т), которые при всех своих основных преимуществах (простота эксплуатации и малая стоимость) имеют целый ряд существенных недостатков, значительно усложняющих работу электрических сетей. Среди недостатков ПК(Т) следует отметить:

1) невозможность автоматического повторного включения цепи после срабатывания предохранителя при перегорании плавкой вставки;

2) неселективная работа – не обеспечивается избирательность отключений;

3) сложность поиска поврежденных участков сети, что приводит к увеличению времени на устранение аварий;

4) опасность для оперативного персонала при проверке и замене предохранителей 6-10 кВ под напряжением и под нагрузкой.

Коммутационным аппаратом, устраняющим существующие недостатки предохранителей и, кроме этого, обладающим функциями разъединителя, является предохранитель-разъединитель выхлопного типа ПРВТ-10.IIУ1 производства ЗАО «ЗЭТО» (г. Великие Луки, РФ) [1].

Совмещение в патроне функций разъединителя и выключателя нагрузки делает этот аппарат с неограниченными возможностями при сравнительно небольшой стоимости. Ведущие страны мира, такие как США, Канада, Австралия и др., в схемах защиты электрооборудования наружной установки широко применяют выхлопные предохранители на напряжение от 6 кВ и выше, в том числе предохранители-разъединители.

ПРВТ-10 как коммутационный аппарат более высокого класса позволяет [2]:

1) обеспечивать видимую сигнализацию срабатывания в режиме предохранителя за счет наличия автоматического откидывающегося патрона, что в свою очередь позволяет эксплуатационному персоналу быстро определить сработавший предохранитель;

2) обеспечить селективность защиты при возникновении ненормальных режимов работы в замкнутых сетях за счет наличия в нем функций разъединителя;

3) производить быструю и удобную замену плавкой вставки с земли (до 5 мин);

4) выполнять функции разъединителя;

5) выполнять отключение токов нагрузки в режиме разъединителя до 10 А.

Предохранители-разъединители предназначены для защиты силовых трансформаторов и распределительных сетей от коротких замыканий и предельных перегрузочных токов частотой 50 Гц, а также включения и отключения участков электрической цепи (с изолированной или заземленной нейтралью) с отключенной нагрузкой при наличии в них емкостных и индуктивных токов при помощи оперативной штанги. Их можно применять для защиты силовых трансформаторов и трансформаторов напряжения, конденсаторных батарей, секционирования линий электропередачи [2].

Предохранители-разъединители выполнены в виде однополюсного аппарата, состоящего из одного фарфорового изолятора, на концах которого, на кронштейнах, закреплены контактные системы. В контактных системах устанавливается держатель заменяемого элемента (патрон) (рис. 1). Труба патрона предохранителя выполнена из армированного газогенерирующего материала, который имеет не только хорошие изоляционные свойства и дугогасящую способность, но и высокую механическую прочность.

Ресурс патрона составляет не менее 5 отключений номинального тока короткого замыкания – 6,3 кА (апериодическая составляющая тока – 11 кА), а токов перегрузки – до нескольких десятков отключений. В патрон предохранителя-разъединителя устанавливается заменяемый элемент с плавкой вставкой.

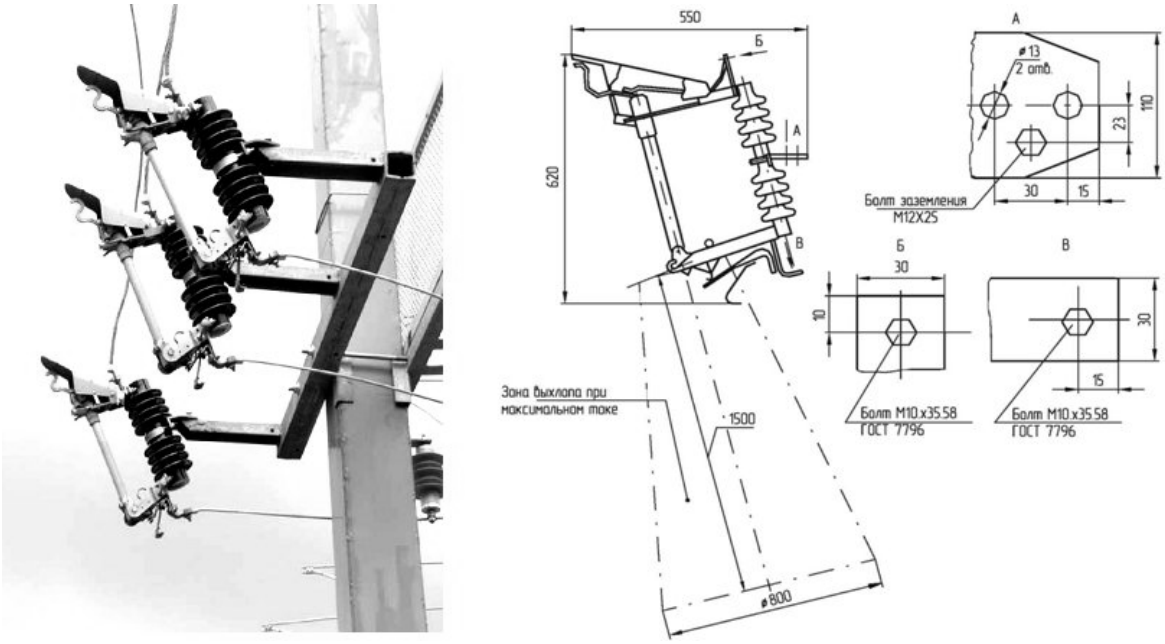


Рис. 1. Внешний вид и конструкция ПРВТ-10

Заменяемые элементы выполняются с двумя типами время токовых характеристик для селективной защиты: типа «К» – быстрые; типа «Т» – медленные, соответствующие по своим характеристикам и надежности требованиям зарубежных стандартов и МЭК. Рабочее положение аппарата – включенное, патрон (он же главный нож) установлен в контактах. Снятие и установка держателя заменяемого элемента вручную осуществляется при помощи специальной оперативной изолирующей штанги.

При прохождении токов перегрузки или короткого замыкания перегорает плавкий элемент, дуга гасится под давлением газа, выделяемого газогенерирующими материалами патрона, происходит срабатывание ПРВТ. Патрон выходит из контактов, обеспечивает видимый разрыв цепи и отключенное положение аппарата. Таким образом, аппарат выполняет одновременные функции защитного аппарата и разъединителя. Основные параметры предохранителя-разъединителя приведены в [1; 2].

Основные материалы исследования

С целью повышения безопасности и удобства обслуживания сетей, на основе ПРВТ-10 кВ ЗАО «ЗЭТО» разработан ряд трансформаторных подстанций 6-10 кВ мощностью от 25 до 160 кВА без разъединительного пункта и шкафа высоковольтных предохранителей (ПТС, ПТСП, КТППР). Для модернизации существующих подстанций шкафного типа до 250 кВА разработана инструкция. Модернизация КТП заключается в замене на столбе разъединителя РЛНД-10 на ПРВТ-10, с соответствующим комплектом монтажных частей и замене в шкафу КТП предохранителей ПКТ на соединительные шины.

При использовании усиленных композитных многогранных опор можно выполнять на одной опоре столбовую подстанцию мощностью до 250 кВА.

Столбовые трансформаторные подстанции (ТП) с применением ПРВТ-10 кВ особенно эффективны в первую очередь в тех местах, где невозможна установка подстанций киоскового типа и по улице проходят высоковольтные и низковольтные линии электропередачи. Применение столбовых ТП с ПРВТ-10 кВ позволяет существенно сократить затраты на техприсоединение отдаленных объектов мощностью 20-30 кВт (так называемый глубокий ввод).

Первый опыт эксплуатации столбовых ТП (Корочанский РЭС, Белгородэнерго) показал, что использование таких подстанций позволяет существенно сократить потери в

сети за счёт уменьшения протяжённости воздушной линии, а также максимально сократить количество оставшихся без электроэнергии потребителей при аварийных отключениях подстанции (рис. 2).

Рис. 2. ПРВТ-10 на существующих объектах электрических сетей

Для оценки экономической целесообразности установки предохранителя-разъединителя ПРВТ-10 кВ при реконструкции существующих и строительстве новых ТП 10/0,4 кВ рассмотрим сравнение двух вариантов по капитальным затратам на коммутационные аппараты и вспомогательное оборудование (опоры и арматура) с эксплуатационными затратами на них.

ВАРИАНТ № 1 «Упрощенная ТП с применением разъединителя РЛНД и предохранителя ПК-10».

ВАРИАНТ №2 «Одностоечная ТП 10/0,4 кВ с применением ПРВТ-10 кВ».

Результаты технико-экономического сравнения затрат на установку и эксплуатацию сведены в таблицу 1.

Секционирование линий коммутационными аппаратами (разъединителями, управляемыми разъединителями, пунктами секционирования) является наиболее эффективным способом повышения надежности электроснабжения в воздушных электрических сетях среднего напряжения.

При использовании схемы построения распределительной сети с ручным секционированием вся работа секционирующих аппаратов (разъединителей, пунктов секционирования) зависит от решений верхнего уровня (диспетчера). Основными элементами сети для выделения (секционирования) поврежденных участков сети на магистрали являются линейные разъединители, а в ряде случаев пункты автоматического секционирования на базе ячеек КРУ. Сетевое резервирование выполняется вручную (рис. 3). При возникновении повреждения на любом участке происходит отключение защитного аппарата на отходящем фидере и все потребители на длительное время теряют питание. Для локализации повреждения на фидер выезжает бригада. Путем последовательных переездов и переключений разъединителей вручную, выделяет поврежденный участок сети и запитывает остальных потребителей от основного и резервных источников питания. При этом задействуется техника, персонал, и длительность отключений достаточно велика.

Таблица 1

Технико-экономическое сравнение вариантов подстанций 10/0,4 кВ

Одностоечная ТП с ПРВТ-10 кВ	**Стоимость затрат, грн (на июль 2006 г.)**	**Упрощенная ТП 10/0,4 кВ с РЛНД-10 и ПК-10**	**Стоимость затрат, грн (на июль 2006 г.)**
Предохранитель-разъединитель ПРТВ-10 кВ (2 шт) с комплектом ЗИП (19 шт плавкие вставки)	6000	Разъединитель РЛНД-10	1100
Работы по монтажу ПРВТ-10	504,23	Работы по монтажу РЛНД-10 с приводом	504,23
–	–	Предохранитель ПК-10	250,00
–	–	Замена ПК-10 (19 шт)	4750,00
Работы по замене плавких вставок (19 шт)	163,2	Работы по замене ПК-10 (19 шт)	163,20
Штанга ШОПР-15 (1 на каждую бригаду ОВБ+2 запасных)	65,00	Привод ПРНЗ-10	175,00
Комплект монтажных элементов	280,00	Комплект монтажных элементов	280,00
Одностоечная опора	1080,00	Одностоечная опора – 2 шт	2160,00
Работы по установке опоры	562,13	Работы по установке опор – 2 шт	1124,26
ИТОГО затрат:	8654,56	ИТОГО затрат:	10431,68

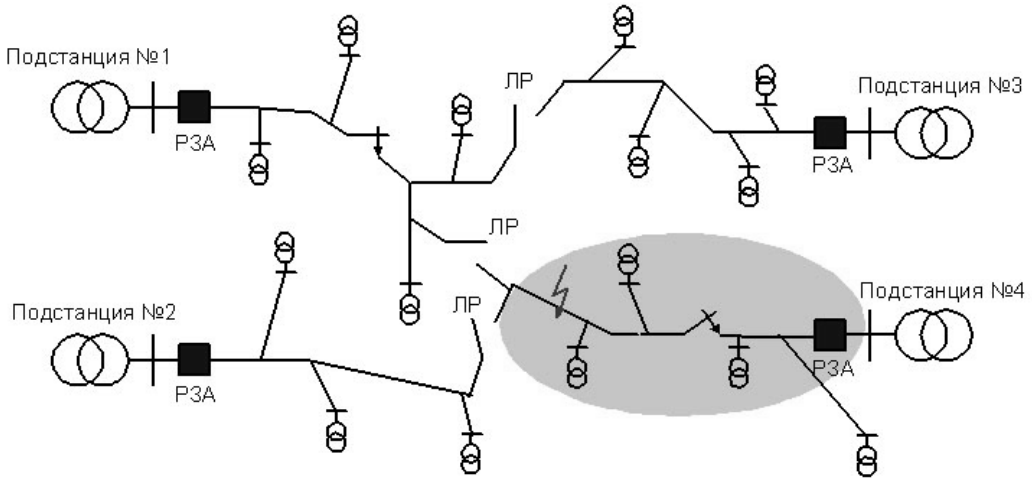


Рис. 3. Существующая схема построения распределительных сетей

Увеличение общей протяженности магистральной линии от центра питания до наиболее удаленного потребителя (так называемая проблема «длинного фидера»), и низкая автоматизация послеаварийных переключений неминуемо приводит к увеличению количества и продолжительности аварийных отключений потребителей, а как следствие к значительному снижению надежности электроснабжения и возможным финансовым штрафным санкциям по качеству электроэнергии.

Таким образом, решение проблемы автоматизации распределительных сетей является актуальным и важным вопросом. Основными задачами автоматизации линий являются:

- повышение надежности электроснабжения потребителей;
- выделение поврежденного участка – зональная организация сетей с использованием пунктов продольного секционирования;
- создание полностью управляемой и наглядной схемы распределительной сети.

Из существующих на сегодняшний день решений, которые позволяют реализовать принципы построения интеллектуальной распределительной сети (рис. 4), являются:

1) установка на магистральных участках сети большой протяженности и линий, к которым подключаются социально значимые объекты, автоматических пунктов секционирования на базе реклоузеров;

2) использование линейных разъединителей качающегося типа серии РЛК-10 для выделения (секционирования) поврежденного участка сети на магистрали;

3) использование ПРВТ-10 на участках многоотпаечных ВЛ для защиты ответвлений сети, а также в составе столбовых ПС 10/0,4 кВ.

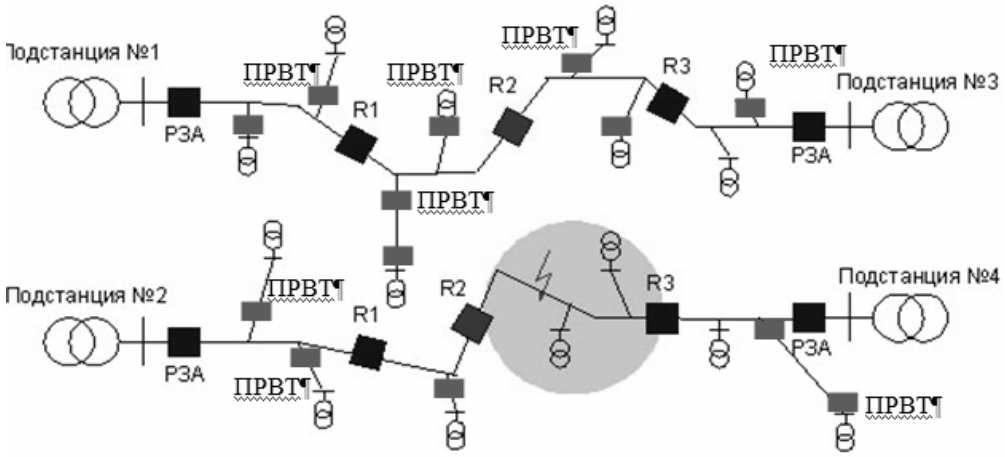


Рис. 4. Схема построения распределительных сетей с применением ПРВТ-10

Реализованная схема автоматизации сети (рис. 4) позволяет выделять поврежденные участки линии за считанные секунды, что значительно сокращает простой трансформаторной мощности и в целом сокращает недоотпуск электрической энергии потребителям. При этом обеспечивается возможность дистанционной реконфигурации топологии сети, автоматического сбора информации о параметрах режимов ее работы и состоянии установленного оборудования.

С целью повышения эффективности работы распределительных сетей Министерство топлива и энергетики Украины приказом № 559 от 20.11.2007 утвердило нормативный документ [4], в соответствии с которым рекомендуется использование ПРВТ-10 в распределительных сетях напряжением 10 кВ при:

- разработке перспективного плана развития сети напряжением 10 кВ;
- выполнении технико-экономических расчетов реконструкции, модернизации и нового строительства распределительных сетей;
- выдаче технических условий на присоединение электроустановок потребителей к электрическим сетям;
- проектировании, реконструкции, модернизации и нового строительства распределительной сети напряжением 10 кВ;
- разработке проектов по повышению надежности электроснабжения;
- разрешении вопросов повышения качества поставляемой электрической энергии потребителям.

Положительный опыт эксплуатации и эффективность применения ПРВТ-10 отмечается в распределительных сетях Псковэнерго, Кировэнерго, ОАО «Сетевая компания» (Республика Татарстан, г. Казань).

Опыт эксплуатации ПРВТ-10 в Южных сетях филиала Кировэнерго является наглядным и точным примером эффективности применения на воздушной линии напряжением 10 кВ. В результате срабатывания ПРВТ-10 кВ после к.з. на отпайке, вызванно-

го обрывом провода вследствие падения дерева, удалось обеспечить бесперебойное электроснабжение социально значимых объектов.

Выводы

1. Внедрение предохранителей-разъединителей выхлопного типа в распределительные сети напряжением 6-20 кВ является перспективным, технологически оправданным мероприятием и отвечает концепции технического перевооружения электрических сетей Украины.

2. Применение предохранителей-разъединителей серии ПРВТ-10 кВ производства ЗАО «ЗЭТО» (г. Великие Луки, РФ) повысит надежность и устойчивость электроснабжения потребителя, позволит снизить эксплуатационные затраты, при этом ПРВТ-10 отвечают всем требованиям по безопасности обслуживания.

Список использованных источников

1. Предохранитель-разъединитель выхлопной ПРВТ-10.ІІУ1. Руководство по эксплуатации. – Великие Луки: ЗАО «ВЗВА», 1999. – 58с.

2. Предохранители-разъединители выхлопного типа серии ПРВТ-10 [Электронный ресурс] / Завод электротехнического оборудования. – Режим доступа: http://zeto.ru/plugins/content/content.php?content.25

3. Руководящие материалы по проектированию распределительных электрических сетей. Рекомендации по применению предохранителей-разъединителей ПРВТ-10 в воздушных электрических сетях напряжением 6-10 кВ. – М.: ОАО «НТЦ электроэнергетики» - РОСЭП, 2008. – 15 с.

4. СОУ-Н ЕЕ 20. 262:2007 Настанова. Застосування запобіжника-роз'єднувача ПРВТ-10.ПУ1 у проектах реконструкції, модернізації та нового будівництва розподільних електричних мереж напругою 10 кВ. – К.: Міністерство палива та енергетики України, 2007. – 29 с.

УДК 621.311

Р.А. Буйный, канд. техн. наук
И.В. Дихтярук, инженер
А.В. Красножон, канд. техн. наук
Черниговский государственный технологический университет, г. Чернигов, Украина

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАЗЪЕДИНИТЕЛЯ РЛКВ-С-10 ДЛЯ СЕКЦИОНИРОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ НАПРЯЖЕНИЕМ 10 кВ

Рассмотрены особенности использования современных коммутационных аппаратов для повышения надежности электроснабжения потребителей, а именно применение разъединителя РЛКВ-С-10 с двигательным приводом типа ПДЖ-1 УХЛ1 для секционирования электрических сетей напряжением 10 кВ.

Вступление

Темпы развития инфраструктуры современного города требуют повышения надежности электроснабжения потребителей. В первую очередь это достигается за счет уменьшения недоотпуска электроэнергии в электрических сетях (ЭС).

В настоящее время одним из эффективных способов повышения надежности ЭС является автоматическое секционирование линий (АСЛ) коммутационными аппаратами. Секционирование – это разделение линии электропередачи на несколько участков с целью сокращения количества потребителей, которые отключаются при возникновении повреждения. Назначение всех типов секционирующих аппаратов заключается в быстрой локализации и отделении поврежденного участка от основной линии во время короткого замыкания (КЗ) или бестоковой паузы.

В настоящее время для автоматического секционирования ЭС используются три типа электрических аппаратов [1]:

- плавкие предохранители;
- выключатели, оснащенные многофункциональной релейной защитой и автоматикой, способные отключать токи КЗ;
- автоматические отделители, которые представляют собой разъединители с простыми устройствами автоматики, способными отключать аппарат только в бестоковую паузу.

Современные средства АСЛ, такие как реклоузеры, представляют собой надежные коммутационные устройства, оборудованные системами измерения токов и напряжений, защиты и автоматики, а также системами дистанционного управления.

Но, несмотря на преимущества таких устройств, они не нашли широкого применения в ЭС, т.к. стоимость работы оперативно-выездной бригады (ОВБ) и убытки от недоотпуска электрической энергии (ЭЭ) оказываются меньшими, чем эффект от использования таких средств секционирования.

Основные материалы исследований

В настоящее время становится возможным использование менее дорогих средств секционирования, которые бы могли выполнять функции автоматического секционирования.

Одним из таких устройств является разъединитель РЛКВ-С-10 с приводом ПДЖ-01 УХЛ1 (рис. 1).

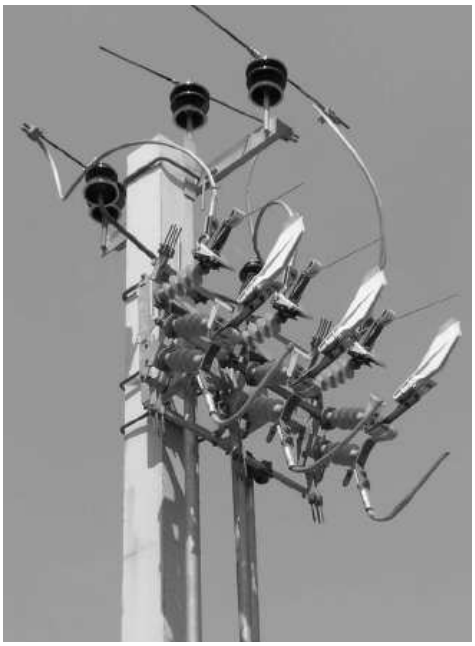


Рис.1. Разъединитель РЛКВ-С-10, установленный на опоре воздушной линии

Такие разъединители, оснащенные дугогасительной системой, предназначены для включения и отключения обесточенных участков электрической цепи, находящихся под напряжением, заземления отключенных участков при помощи заземлителей (при их наличии), составляющих единое целое с разъединителями, а также для отключения токов нагрузки до 50 А, токов холостого хода трансформаторов и зарядных токов воздушных (ВЛ) и кабельных линий (КЛ) до 10 А. Основные технические параметры разъединителей типа РЛК приведены в каталоге [2].

Управление разъединителем может осуществляется как ручным приводом, так и двигательным приводом типа ПДЖ-1 УХЛ1 [2]. Применение двигательного привода позволяет управлять разъединителем дистанционно. А возможность его комплектации простейшими видами защиты и диагностики, в свою очередь, позволяет реализовать автоматизированный режим управления сетью. Это значительно экономит время на поиск и локализацию повреждений, что улучшает надежность электроснабжения потребителей.

Рассмотрим возможность использования разъединителя РЛКВ-С-10 для секционирования электрической сети, представленной на рисунке 2.

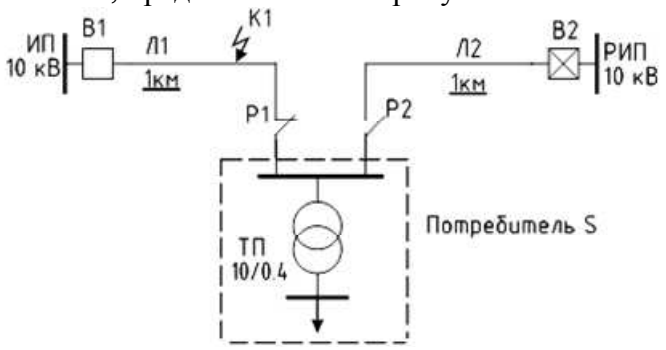


Рис.2. Фрагмент электрической сети

В данном фрагменте сети потребитель S питается от основного источника питания ИП по линии Л1. Для повышения надежности электроснабжения потребителя предусмотрен резервный источник питания (РИП). В нормальном режиме выключатель В1 и разъединитель Р1 находятся во включенном положении, а В2 и Р2 – в выключенном.

При возникновении КЗ на линии Л1 отключается выключатель В1. В случае использования обычных разъединителей с ручным приводом для возобновления электроснабжения потребителя S и устранения повреждения на соответствующий участок ЭС направляется ОВБ, которая отключает разъединитель Р1, включает разъединитель Р2 и выключатель В2, тем самым возобновляя электроснабжение потребителя от РИП. После чего происходит поиск, устранение повреждения на линии и возвращение схемы электрической сети к нормальному режиму работы. Длительность простоя ЭС в таких случаях составляет от 1,5 до 6 часов [3].

При использовании вместо Р1 и Р2 разъединителей марки РЛКВ-С-10 с приводом ПДЖ-01 УХЛ1 после отключения КЗ диспетчеру достаточно дистанционно отключить сначала секционирующий разъединитель СР1, а затем включить СР2 и выключатель В2, после чего возобновляется электроснабжение потребителя (рис. 3).

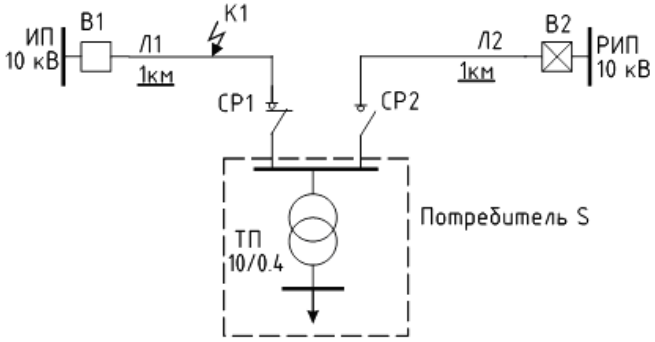


Рис.3. Фрагмент электрической сети с применением разъединителя РЛКВ-С-10 с приводом ПДЖ-01 УХЛ1

Такая процедура занимает 10-15 минут, что позволяет значительно снизить недоотпуск ЭЭ и расходы на возобновление электроснабжения.

Мерой надежности системы электроснабжения в обоих случаях будем считать количество недоотпущенной ЭЭ. Ожидаемый недоотпуск потребителю соответствует произведению средней величины нагрузки на эквивалентную продолжительность простоя за период времени [3].

$$\Delta W = \overline{P} \cdot \Theta_э, \quad (1)$$

где $\overline{P}$ – средняя величина нагрузки потребителя, кВт;

$\Theta_э$ – эквивалентная продолжительность простоя за год, ч/год.

Эквивалентная продолжительность простоя потребителя за год определяется [3]:

$$\Theta_э = \omega \cdot \tau + \xi \cdot \nu \cdot \eta, \quad (2)$$

где ω – суммарная частота отказов потребителей, год-1;

τ – среднее время восстановления электроснабжения потребителям, ч;

ν – суммарная частота преднамеренных отключений, год-1;

η_i – среднее время обслуживания элементов при плановых ремонтах, ч;

ξ=0,33 – коэффициент, отражающий меньшую тяжесть преднамеренных отключений по сравнению с внезапными отказами.

Для сравнения приведенных выше вариантов необходимо определить затраты на включение резервного источника питания $З_{РИП}$. Эти затраты состоят из двух основных составляющих:

$$З_{РИП} = З_{дост} + З_{пер}, \quad (3)$$

где $З_{дост}$ – затраты на транспортировку оперативной бригады на место проведения переключений и обратно;

$З_{пер}$ – затраты на проведение переключений работниками ОВБ.

Затраты на транспортировку ОВБ к месту работы состоят из следующих частей [4]:

- заработная плата работников бригады;
- зарплата работника, занятого в управлении автотранспортом;
- затраты на эксплуатацию транспортного средства, которое транспортирует бригаду к месту проведения работ.

Затраты на заработную плату работников определяются по формуле:

$$З_{ЗП} = \frac{l}{v_{ср}} \cdot C_i, \quad (4)$$

где l – расстояние от ремонтного предприятия до энергообъекта и обратно, км;

$v_{ср}$ – средняя скорость передвижения автотранспорта при доставке бригады, км/ч;

C_i – почасовая ставка работника ремонтного предприятия.

Затраты на эксплуатацию автотранспорта рассчитываются по формуле:

$$З_{эк} = Cm + З_{ГСМ} + З_{И}, \quad (5)$$

где Cm – стоимость потраченных машино-часов, грн;

$З_{ГСМ}$ – затраты на горюче-смазочные материалы, грн;

$З_{И}$ – затраты на эксплуатацию шин, грн;

Стоимость потраченных машино-часов определяют по формуле:

$$Cm = C \cdot M, \quad (6)$$

где C – стоимость одного машино-часа, грн/маш·ч (стоимость одного машино-часа также включает в себя заработную плату работника, занятого в управлении автотранспортом).

M – количество машино-часов, потраченных на доставку ОВБ на место проведения работ.

Затраты на горюче-смазочные материалы:

$$З_{ГСМ} = H_p \cdot l, \quad (7)$$

где H_p – норма расхода горюче-смазочных материалов л/100 км;

Затраты на эксплуатацию шин:

$$З_{И} = H_И \cdot t_{пр}, \quad (8)$$

где $H_И$ – норма износа шин автотранспорта, грн/ч;

$t_{пр}$ – время, затрачиваемое на доставку ОВБ на место проведения работ, ч.

Время, затрачиваемое на проведение переключений работниками ОВБ, составляет 0,4 часа и определяется по формуле [3]:

$$З_{пер} = T \cdot C_i, \quad (9)$$

где T – продолжительность проведения переключений, ч.

Результаты сравнения двух вариантов:

- вариант 1 – применение обычных разъединителей с ручным приводом для возобновления электроснабжения (рис. 2);
- вариант 2 – использование автоматизированных разъединителей типа РЛКВ-С-10 с приводом ПДЖ-01 УХЛ1 (рис. 3);

Это показывает, что использование РЛКВ-С-10 с приводом ПДЖ-01 УХЛ1 является более эффективным, чем ручное секционирование (табл. 1).

Таблица 1

Значения технико-экономических параметров сравниваемых вариантов

Параметры	Значение параметров для вариантов	
	вариант 1	вариант 2
Эквивалентная продолжительность простоя, ч/год	1,25	0,0625
Среднее время восстановления питания, ч	1,5-6	0,2-0,25
Затраты на заработную плату ОВБ, грн	58,05-232,2	0
Затраты на проезд ОВБ до места проведения работ, грн на 10 км	41,42	0

Срок окупаемости $T_{ОК}$ секционирующих разъединителей СР1 и СР2 зависит от мощности потребителя и длины линии, по которой питается потребитель. Он может быть определен как отношение капиталовложений к прибыли.

$$T_{ОК} = \frac{К}{Е}, \quad (10)$$

где $Е$ – эффект (годовая прибыль), грн/год;

$К$ – капиталовложения, грн.

Капиталовложения состоят из затрат на самоустройство, а также его монтаж и пусконаладочные работы. Годовой эффект от использования РЛКВ-С-10 для секционирования может быть рассчитан по формуле:

$$Е = З_{РИП} + У + Ш_н, \quad (11)$$

где $У$ – ущерб, нанесенный потребителю вследствие недоотпуска ЭЭ, в расчетах будем принимать самый благоприятный вариант, при котором ущерб от недоотпуска ЭЭ равен нулю, так как в противном случае срок окупаемости будет снижаться;

$Ш_н$ – штраф за недоотпуск ЭЭ потребителю.

Согласно правилам пользования электрической энергией штраф за недоотпуск ЭЭ взимается с энергоснабжающей компании в размере двукратной стоимости недоотпущенной потребителю электрической энергии [5]. Поэтому

$$Ш_н = 2 \cdot \Delta W_0 \cdot Ц_1 \cdot l_{линии}, \quad (12)$$

где ΔW_0 – ожидаемый недоотпуск потребителю, приведенный к одному км линии, кВт*ч;

$Ц_1$ – цена одного кВт*ч, грн/ кВт*ч;

$l_{линии}$ – длина линии, которая связывает потребителя и источник питания, км.

Цена одного кВт*ч в расчетах была взята из официального сайта национальной комиссии по регулированию энергетики для второго класса потребителей от 23.09.2011 [6].

Используя вышеизложенное, можно определить зависимости срока окупаемости от средней мощности потребителя для различных длин линии. Такие зависимости представлены на рисунке 4.

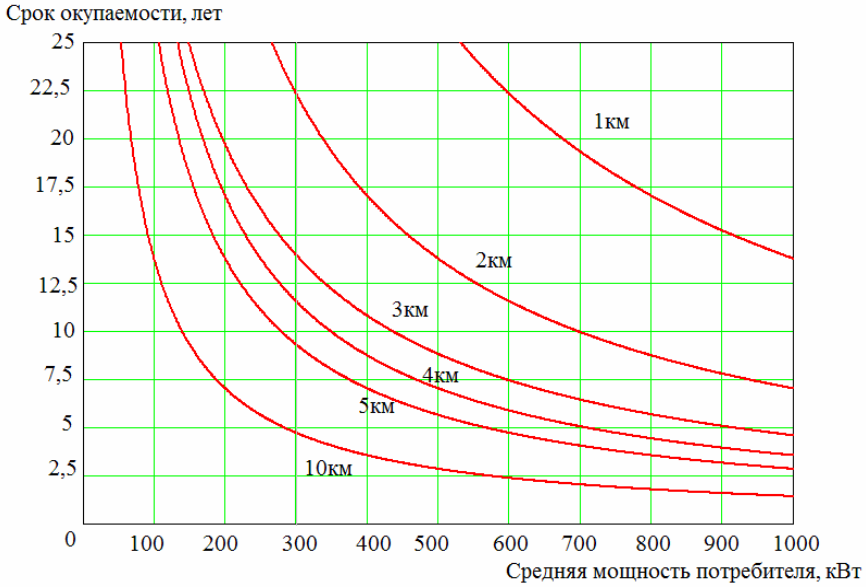


Рис.4. Зависимость срока окупаемости от средней мощности потребителя для разных длин питающей линии

Из полученных зависимостей можно увидеть, что наиболее эффективным будет использование разъединителя РЛКВ-С-10 для секционирования линий 10 кВ протяженностью более 5 км и средней мощностью потребителей, подключенных к этой линии, более 300 кВт. При увеличении длины питающей линии и мощности потребителей, подключенных к этой линии, срок окупаемости уменьшается до нескольких лет.

Выводы

Использование разъединителя РЛКВ-С-10 с приводом ПДЖ-01 УХЛ1 для секционирования линий 10 кВ позволяет:

- значительно уменьшить недоотпуск ЭЭ потребителям за счет уменьшения эквивалентной продолжительности простоя потребителя с 1,25 до 0,0625 ч/год;
- экономить средства на работе ОВБ при включении резервного источника питания;
- уменьшить время восстановления питания до нескольких минут;
- производить реконфигурацию сети при рабочих токах нагрузки до 50 А;
- дистанционно вводить резервный источник питания при отказе основного.

Список использованных источников

1. Оценка эффективности автоматического секционирования воздушных распределительных сетей с применением реклоузеров с целью повышения надежности электроснабжения потребителей [Электронный ресурс] / Б. К. Максимов, В. В. Воротницкий. – Режим доступа: http://www.tavrida.ru/Techno/Article.aspx?aid=607.

2. Разъединители наружной установки на 10 кВ: каталог / Завод электротехнического оборудования. – Великие луки, 2010. – 18 с.

3. Надежность систем электроснабжения / В. В. Зорин, В. В. Тисленко, Ф. Клеппель, Г. Адлер. – К.: Высшая школа, 1984. – 192 с.

4. ГНД 34.05.102-2003 Порядок визначення вартості ремонту і технічного ослуговування електричних мереж. – К.: ОЕП «ГРІФРЕ», 2004. – 22 с.

5. Правила користування електричною енергією. – К.: ДП “НТУКЦ”, 2005. – 121 с.

6. Національна комісія з регулювання енергетики. Офіційний сайт [Електроный ресурс]. – Режим доступу: http://www.nerc.gov.ua/.

УДК 621.3.05

І.В. Пентегов, д-р техн. наук
А.Л. Приступа, канд. техн. наук
Чернігівський державний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА УСТАНОВКА ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕСЛІВСЬКИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ БЕЗКОНТАКТНІЙ ЗАРЯДЦІ АКУМУЛЯТОРІВ

Представлено опис експериментальної установки для дослідження теслівських процесів при безконтактній зарядці акумуляторів різних пристроїв. Розраховано параметри елементів установки. Показано, як параметри установки адаптуються до методики розрахунку теслівських процесів при бездротовій передачі енергії.

Опис експериментальної установки

Для проведення експериментальних досліджень бездротової передачі енергії за допомогою теслівських процесів був розроблений макет, електрична принципова схема якого наведена на рис. 1.

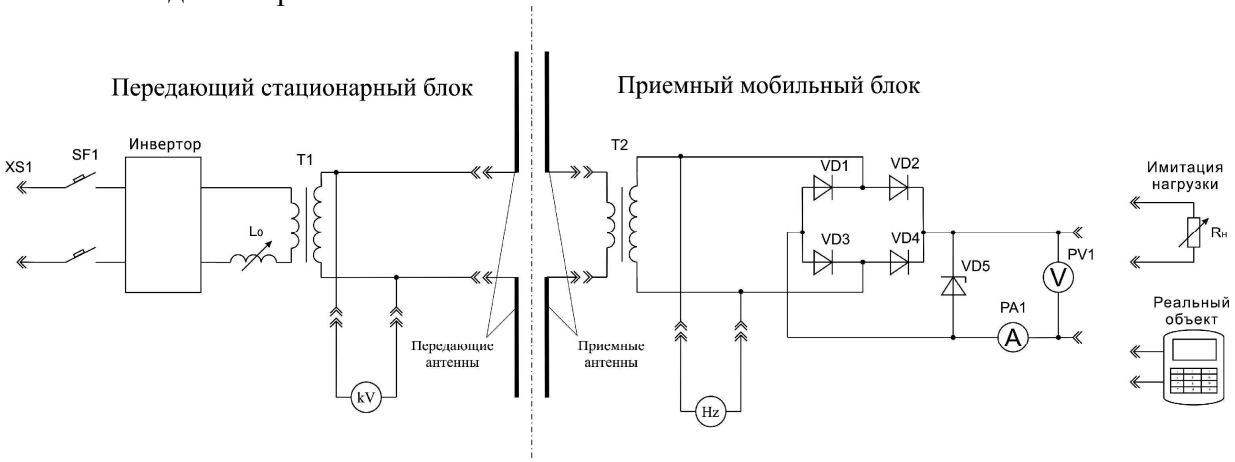


Рис. 1. Схема електричної принципової експериментальної установки

Як джерело високочастотного струму передбачається використовувати транзисторний резонансний інвертор, що живиться від мережі змінної напруги 220 В промислової частоти 50 Гц. Внутрішня схема інвертора на характер досліджуваних теслівських процесів докорінно не впливає, тому на принциповій схемі (рис. 1) він зображений у вигляді чотириполюсника, і його схемні особливості не враховуються при аналізі процесів передачі енергії.

За допомогою поздовжнього резонансного дроселя L_0 можна вибирати положення робочої точки на резонансній кривій.

Високовольтний високочастотний трансформатор Т1 призначений для підвищення напруги джерела, тим самим збільшуючи інтенсивність теслівських процесів.

До складу приймального блоку установки входять: понижувальний трансформатор Т2; випрямляч (VD1 – VD4); стабілітрон VD5 і навантаження.

Трансформатор Т2 необхідний для формування рівнів струму й напруги, необхідних для підзарядки акумуляторів різних пристроїв.

Стабілітрон служить для захисту акумулятора від можливих перенапруг.

Еквівалентна схема заміщення цієї установки представлена на рис. 2.

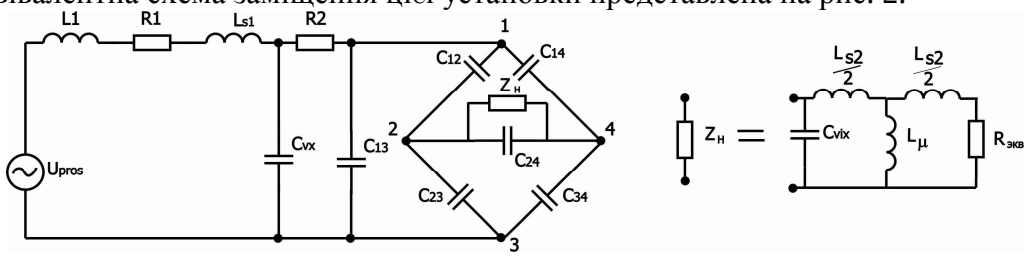


Рис. 2. Еквівалентна схема заміщення експериментальної установки

Розрахунок параметрів схеми заміщення

Розрахунок індуктивності розсіювання обмоток

Індуктивність розсіювання є одним з параметрів, що визначають якість роботи трансформатора [1]. Вона дуже сильно впливає й на характер процесу бездротової передачі енергії за допомогою теслівських процесів. Індуктивність розсіювання трансформатора визначається згідно з методом Роговського за формулою:

$$L_S = k_R \cdot \frac{\mu_0}{h} \cdot w_1^2 \cdot l_{об} \cdot \left(b_{12} + \frac{b_1 + b_2}{3} \right), \quad (1)$$

де b_1, b_2 – товщина первинної й вторинної обмотки; b_{12} – відстань між первинною й вторинною обмотками; h – висота обмотки; w_1 – число витків первинної обмотки; w_2 – число витків вторинної обмотки; $l_{об}$ – середня довжина витка обмотки; μ_0 – магнітна постійна, рівна $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; k_R – коефіцієнт Роговського, що визначається за формулою:

$$k_R = 1 - \frac{b_1 + b_2 + b_{12}}{\pi \cdot h}. \quad (2)$$

Індуктивність розсіювання підвищувального трансформатора приведена до вторинної обмотки:

$$L_{s1} = L_s \cdot \left(\frac{w_2}{w_1} \right)^2. \quad (3)$$

Конструктивні параметри трансформаторів і результати розрахунку представлені в табл. 1.

Таблиця 1

Параметри трансформаторів

Трансформатор	w_1	w_2	b_1, мм	b_2, мм	b_{12}, мм	$l_{об}$, мм	h, мм	L_S, мГн
підвищувальний	16	750	1,2	0,355	20	150	150	166
понижувальний	480	20	2	0,7	0,5	50	7	2,235

Розрахунок власних ємностей обмоток

Крім індуктивності розсіювання, іншим важливим параметром для трансформаторів є власна ємність обмоток. У загальному випадку власна ємність обмоток складається з ємностей між внутрішнім шаром обмотки та магнітопроводом C_1, між шарами обмоток C_2, між обмотками C_3 [2].

При аналізі різних схем з'єднань обмоток трансформатора користуються інтегральним значенням ємності, що визначається з умови рівності електричної енергії, зосередженої в зазначеній ємності та її складових [2].

Формули для визначення ємностей трансформатора мають вигляд [2]:

$$C_1 = \frac{8\varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot r \cdot l_{об} \cdot n}{4a - \pi \cdot r}, \quad (4)$$

$$C_2 = \frac{4\varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot r \cdot l_{об} \cdot n}{(4a_1 - \pi \cdot r) \cdot (m-1)}, \quad (5)$$

$$C_3 = \frac{4\varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot r_{ср} \cdot l_{об} \cdot n_{ср}}{4a_2 - \pi \cdot r_{ср}}, \quad (6)$$

де ε_r – відносна діелектрична проникність ізоляції; ε_0 – електрична постійна; r – радіус неізольованого проводу; $l_{об}$ – середня довжина витка обмотки; a – відстань між магнітопроводом і віссю проводу; n – число витків у першому шарі; m – число шарів; $2a_1$ – відстань між осями витків проводу в сусідніх шарах; $r_{ср}$ – середній радіус голого проводу суміжних обмоток; $n_{ср}$ – середнє число витків у суміжних шарах обмоток; $2a_2$ – відстань між осями проводів суміжних шарів сусідніх обмоток.

Для розрахунку сумарної ємності підвищувального трансформатора приведемо параметри його ємностей до вторинної обмотки за формулами [2]:

$$C_1' = C_1 \cdot \left(\frac{w_1}{w_2}\right)^2, \quad C_3' = C_3 \cdot \left(1 - \frac{w_1}{w_2}\right)^2. \tag{7}$$

Сумарна ємність підвищувального трансформатора для цього випадку розраховується за формулою [3]:

$$C_{vx} = C_1' + C_3' \tag{8}$$

Конструктивні параметри підвищувального трансформатора і результати розрахунку ємностей представлені в табл. 2.

Таблиця 2

Конструктивні параметри підвищувального трансформатора

w_1	w_2	ε_r	r, мм	a, мм	n	m	$l_{об}$, мм	$r_{ср}$, мм	$n_{ср}$	$2a_2$, мм	$2a_1$, мм	C_1, пФ	C_2, пФ	C_3, пФ	C_{vx}, пФ
16	750	4	0,6	18	48	1	150	0,4	400	24	24	17,55	0	70,86	67,85

Для розрахунку сумарної ємності понижувального трансформатора приведемо параметри його ємностей до первинної обмотки відповідно до формул:

$$C_1' = C_1 \cdot \left(\frac{w_2}{w_1}\right)^2, \quad C_3' = C_3 \cdot \left(1 - \frac{w_2}{w_1}\right)^2. \tag{9}$$

Сумарна ємність понижувального трансформатора для цього випадку розраховується за формулою:

$$C_{vix} = C_1' + C_2 + C_3'. \tag{10}$$

Конструктивні параметри понижувального трансформатора і результати розрахунку ємностей представлені в табл. 3.

Таблиця 3

Конструктивні параметри понижувального трансформатора

w_1	w_2	ε_r	r, мм	a, мм	n	m	$l_{об}$, мм	$r_{ср}$, мм	$n_{ср}$	$2a_2$, мм	$2a_1$, мм	C_1, пФ	C_2, пФ	C_3, пФ	C_{vix}, пФ
480	20	4	0,18	1,5	10	8	50,3	0,115	35	1	0,2	13,94	37,69	109,22	138

Розрахунок індуктивності намагнічування трансформатора

Оскільки магнітна проникність осердя трансформатора набагато більша магнітної проникності повітря, лише незначна частина силових магнітних ліній у вигляді потоку розсіювання замикається поза осердям. Тому при визначенні індуктивності намагнічування трансформатора будемо вважати, що весь магнітний потік зосереджений в осерді з поперечним перерізом S. У цьому випадку індуктивність намагнічування визначається за формулою [4]:

$$L_{нам} = \frac{\mu_0 \cdot \mu \cdot w_1^2 \cdot S \cdot k_c \cdot \ln\frac{l_2}{l_1}}{l_1\left(\frac{l_2}{l_1} - 1\right)}, \tag{11}$$

де μ – магнітна проникність матеріалу осердя; k_c – коефіцієнт заповнення; l_1 – мінімальна довжина силової магнітної лінії; l_2 – максимальна довжина силової магнітної лінії.

Конструктивні параметри трансформаторів і результати розрахунку представлені в табл. 4.

Таблиця 4

Параметри трансформаторів

Трансформатор	w_1	μ	l_1, мм	l_2, мм	S, мм^2	$L_{нам1}$, мГн
підвищувальний	16	5000	524	628	325	7,84
понижувальний	480	2000	30	44	176	710

Індуктивність намагнічування підвищувального трансформатора приводиться до вторинної обмотки за формулою:

$$L_{\mu 1} = L_{нам1} \cdot \left(\frac{w_2}{w_1} \right)^2 . \quad (12)$$

Оскільки індуктивність намагнічування підвищувального трансформатора набагато перевищує індуктивність намагнічування понижувального трансформатора, то її вплив на процеси, що відбуваються в схемі передачі енергії, незначний і при складанні схеми заміщення її можна не враховувати.

Розрахунок активних опорів трансформатора

При розрахунку опорів трансформатора враховується тільки омічний опір обмоток, нехтуючи скін-ефектом через малий перетин провідників.

Омічні опори обмоток трансформатора визначаються за формулою:

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (13)$$

де ρ – питомий опір матеріалу провідника обмотки; l – загальна довжина обмотки; S – площа поперечного перерізу провідника обмотки.

Приведемо опір первинної обмотки підвищувального трансформатора до вторинної, а опір вторинної обмотки понижувального трансформатора до первинної за формулами:

$$R1_1 = R1 \cdot \left(\frac{w_2}{w_1} \right)^2, \quad R2_2 = R2 \cdot \left(\frac{w_1}{w_2} \right)^2 . \quad (14)$$

Конструктивні параметри обмоток трансформаторів і результати розрахунку представлені в табл. 5.

Таблиця 5

Параметри обмоток і результати розрахунку активних опорів трансформаторів

Трансформатор	ρ, Ом·м	$l1$, мм	$l2$, мм	$r1$, мм	$r2$, мм	$S1$, мм^2	$S2$, мм^2	$R1_1$, Ом	$R2_2$, Ом
підвищувальний	$1{,}7 \cdot 10^{-8}$	$1{,}1 \cdot 10^4$	$2{,}83 \cdot 10^5$	0,6	0,18	4,5	0,4	90	12,14
понижувальний	$1{,}7 \cdot 10^{-8}$	$7{,}54 \cdot 10^3$	188,5	0,05	0,18	0,03	0,4	4	4,6

Розрахунок часткових ємностей між антенами

Розрахунок часткових ємностей C_{12}, C_{13}, C_{14}, C_{23}, C_{24}, C_{34} між антенами виконується для кожного конкретного випадку окремо [5-7].

Розрахунок параметрів схеми заміщення

Змінна індуктивність $L1$ являє собою сумарну індуктивність інвертора, з'єднувальних проводів і резонансного дроселя. За формулою (3) ця індуктивність приводиться до вторинної обмотки підвищувального трансформатора (табл. 6).

Опір $R1$ являє собою суму омічних опорів інвертора, резонансного дроселя, з'єднувальних проводів і первинної обмотки підвищувального трансформатора, розрахованих за формулою (13) і приведених за формулою (14) до вторинної обмотки підвищувального трансформатора.

Коефіцієнт трансформації трансформаторів визначається за формулою:

$$k_{TP} = \left(\frac{w_1}{w_2} \right). \quad (15)$$

У табл. 6 представлені чисельні значення параметрів схеми заміщення, зображеної на рис. 2, які приведені до вторинної обмотки підвищувального трансформатора й первинної обмотки понижувального трансформатора.

Таблиця 6

Параметри схеми заміщення

$L1$, мГн	$R1$, Ом	L_{s1}, мГн	$R2$, Ом	C_{vx}, пФ	C_{vix}, пФ	L_{s2}, мГн	L_{μ}, мГн	U_{pros}, кВ	k_{TP1}	k_{TP2}
40..650	160	166	13	67,85	138	2,5	710	11,72	0,021	24

Розрахунок енергетичних параметрів схеми

Розрахунок енергетичних параметрів схеми проводиться аналогічно методикам, описаним у працях [5-7].

Для того, щоб привести розглянуту схему до виду неврівноваженого моста, для якого відомі методи розрахунку, необхідно виконати перетворення: приведемо опір середовища передачі разом з навантаженням до вихідних затискачів передавального блоку (рис. 4).

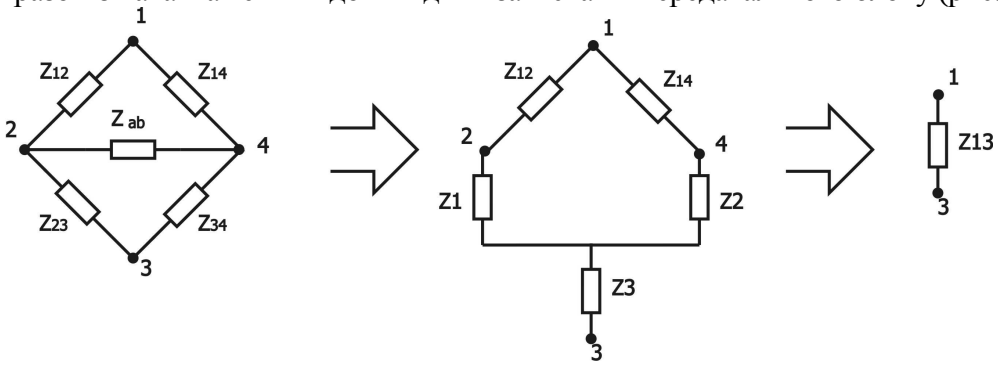


Рис. 4. Приведення опору середовища передачі й прийомного блоку до вихідних затискачів передавального блоку

Для цього перетворимо трикутник опорів $Z_{ab} – Z_{23} – Z_{34}$ у зірку Z1 – Z2 – Z3, а потім знайдемо еквівалентний опір Z13 [8].

$$Z1=\frac{Z_{23}\cdot Z_{ab}}{Z_{23}+Z_{ab}+Z_{34}}, Z2=\frac{Z_{34}\cdot Z_{ab}}{Z_{23}+Z_{ab}+Z_{34}}, Z3=\frac{Z_{23}\cdot Z_{34}}{Z_{23}+Z_{ab}+Z_{34}}, Z13=Z3+\frac{(Z_{12}+Z1)\cdot(Z_{14}+Z2)}{Z_{12}+Z1+Z_{14}+Z2}, \quad (16)$$

де Z_{12}, Z_{14}, Z_{23}, Z_{34} – комплексні опори середовища передачі, Z_{ab} – опір вітки 2-4, визначаються за формулами:

$$Z_{14}=\frac{1}{j\omega\cdot C_{14}}, \quad Z_{34}=\frac{1}{j\omega\cdot C_{34}}, \quad Z_{23}=\frac{1}{j\omega\cdot C_{23}}, \quad Z_{12}=\frac{1}{j\omega\cdot C_{12}}, \quad (17)$$

$$Z_{ab}=\left(\frac{1}{Z_H}+j\omega\cdot C_{24}\right)^{-1}, \quad Z_H=\left(\left(\frac{j\omega\cdot L_{S2}}{2}+\frac{j\omega\cdot L_{\mu}\cdot\left(\frac{j\omega\cdot L_{S2}}{2}+R_{экв}\cdot k_{TP2}^2\right)^{-1}}{j\omega\cdot L_{\mu}+\frac{j\omega\cdot L_{S2}}{2}+R_{экв}\cdot k_{TP2}^2}\right)^{-1}+j\omega\cdot C_{vix}\right)^{-1}. \quad (18)$$

Таким чином, у результаті перетворень одержуємо схему, представлену на рис. 5.

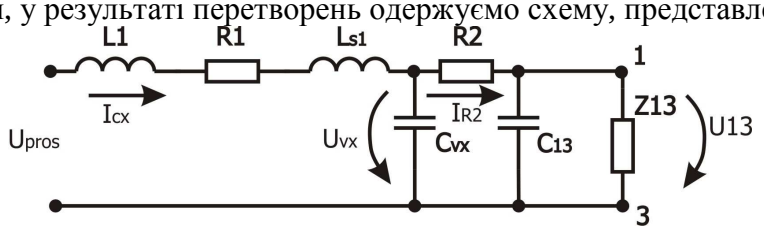


Рис. 5. Розрахункова схема для визначення енергетичних параметрів передавального блоку

Для знаходження напруги між передавальними антенами виконаємо перетворення:

$$Z_{cx}=R1+j\cdot\omega(L1+L_{s1})+\left[j\cdot\omega\cdot C_{vx}+\left(R2+\frac{Z13}{1+j\cdot\omega\cdot C_{13}\cdot Z13}\right)^{-1}\right]^{-1},$$

$$I_{cx}=\frac{U_{pros}}{Z_{cx}}, \; U_{pros}=\frac{U_{invertora}}{k_{TP1}}, \; U_{vx}=U_{pros}-I_{cx}\cdot(R1+j\cdot\omega(L1+L_{s1})), \quad (19)$$

$$I_{R2}=\frac{U_{vx}}{R2+\frac{Z13}{1+j\cdot\omega\cdot C_{13}\cdot Z13}}, \; U13=U_{vx}-I_{R2}\cdot R2$$

Після цих перетворень одержимо схему, представлену на рис. 6.

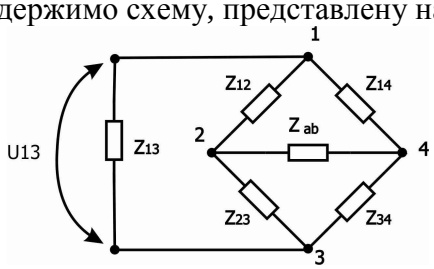


Рис. 6. Розрахункова схема процесу передачі енергії за допомогою теслівських процесів

Використовуючи метод еквівалентного генератора, знайдемо струм у вітці 2-4:

$$U_{24} = U13\left(\frac{Z_{12}}{Z_{23}+Z_{12}} - \frac{Z_{14}}{Z_{14}+Z_{34}}\right), \qquad I_{24} = \frac{U_{24}}{\left(Z_{ab} + \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1+Z_2} + \frac{Z_3 \cdot Z_4}{Z_3+Z_4}\right)}. \tag{20}$$

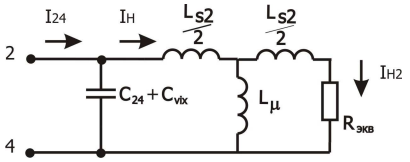


Рис. 7. Розрахункова схема приймального блоку

У навантаження відгалужується частина струму I_{24}, яка дорівнює:

$$I_{H1} = I_{24} \cdot \frac{1}{1 + j\omega \cdot (C_{24} + C_{vix}) \cdot \left(\frac{j\omega \cdot L_{S2}}{2} + \frac{j\omega \cdot L_\mu \cdot \left(\frac{j\omega \cdot L_{S2}}{2} + R_{экв} \cdot k_{TP2}^2 \right)}{j\omega \cdot L_\mu + \frac{j\omega \cdot L_{S2}}{2} + R_{экв} \cdot k_{TP2}^2} \right)}. \tag{21}$$

Таким чином, струм навантаження, приведений до вторинної обмотки трансформатора Т2:

$$I_H = I_{H1} \cdot \frac{j\omega \cdot L_\mu}{j\omega \cdot L_\mu + \frac{j\omega \cdot L_{S2}}{2} + R_{экв} \cdot k_{TP2}^2} \cdot k_{TP2}. \tag{22}$$

Напруга на навантаженні відповідно:

$$U_H = R_{экв} \cdot I_H. \tag{23}$$

Зовнішній вигляд експериментальної установки представлено на рис. 8.

1. Высокочастотный инвертор;
2. Резонансный дроссель;
3. Повышающий высокочастотный трансформатор;
4. Передающие антенны;
5. Приемные антенны;
6. Согласующий высокочастотный микротрансформатор;
7. Переменная нагрузка;
8. Киловольтметр;
9. Выпрямительный мост;
10. Измерительные приборы для снятия энергетических характеристик тесловских процессов.

Рис. 8. Експериментальна установка дослідження теслівських процесів при безконтактній зарядці акумуляторів

Висновки

1. Розроблено експериментальну установку для дослідження теслівських процесів при безконтактній підзарядці акумуляторів.
2. Розраховано параметри елементів, що входять в експериментальну установку.
3. Показано, як параметри установки адаптуються до методики розрахунку теслівських процесів при бездротовій передачі енергії.

Список використаних джерел

1. Васютинский С. Б. Вопросы теории и расчета трансформаторов / С. Б. Васютинский. – Л.: Энергия, 1970. – 432 с.
2. Расчет электромагнитных элементов источников вторичного электропитания / А. Н. Горский, Ю. С. Русин, Н. Р. Иванов, Л. А. Сергеева. – М.: Радио и связь, 1988. – 176 с.
3. Сергеенков Б. Н. Электрические машины: трансформаторы: учеб. пособие для электромех. спец. вузов / Б. Н. Сергеенков, В. М. Киселев, Н. А. Акимова. – М.: Высш. шк., 1989. – 352 с.
4. Пентегов И. В. Особенности расчета индуктивностей рассеяния трансформаторов с развитыми магнитными потоками рассеяния / И. В. Пентегов, С. В. Рымар // Електротехніка і електромеханіка. – 2004. – № 2. – С. 38-45.
5. Пентегов И. В. О возможности беспроводной передачи энергии с помощью тесловских процессов / И. В. Пентегов, А. Л. Приступа // Техническая электродинамика. – 2005. – № 3. – С. 11-15.
6. Пентегов І. В. Аналіз теслівських процесів при передачі енергії без проводів / І. В. Пентегов, А. Л. Приступа // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. – 2005. – № 25. – С. 116-122.
7. Пентегов И. В. Применение тесловских процессов для бесконтактного заряда аккумуляторов бытовых электрических устройств / И. В. Пентегов, И. В. Волков, А. Л. Приступа // Технічна електродинаміка. (Тем. вип. „Проблеми сучасної електротехніки”). – 2006. – Ч. 2.– С. 16-21.
8. Нейман Л. Р. Теоретические основы электротехники / Л. Р. Нейман, К. С. Демирчян. – М.: Энергия, 1966.

УДК 621.316.722.076.12

Ю.О. Денисов, д-р техн. наук
О.М. Городній, м.н.с.
О.А. Купко, магістрант
Чернігівський державний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ ТА СТАТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ КРІП-ПНС ПАРАЛЕЛЬНОГО ТИПУ

Експериментально досліджені особливості вихідної та регулювальної характеристик паралельного імпульсного квазірезонансного перетворювача та вплив комутаційних мікропроцесів на режим перемикання при нульовому струмі.

Вступ

Паралельні імпульсні перетворювачі (ІП) постійної напруги знайшли ефективне застосування у коректорах коефіцієнта потужності (ККП) для наближення форми струму, що споживається від мережі живлення, до синусоїдальної форми [1]. Але такі перетворювачі мають низку серйозних недоліків:

1) силовий транзистор перемикається при значних показниках струму та напруги, що призводить до значної динамічної потужності розсіювання енергії на ньому. Це знижує ККД та обмежує частоту комутації, яка впливає на якість корекції коефіцієнта потужності;

2) при наявності різких фронтів у процесі комутації транзистора та наявності в нього і в інших елементах схеми паразитних параметрів (ємностей ключа та міжвиткової ємності дроселя, індуктивностей, нелінійних процесів розсмоктування та накопичення носіїв на переходах транзисторів та ін.) в ІП виникають паразитні коливання на висо-

ких частотах. Згідно з вимогою міжнародних стандартів [1; 2] рівень потужності електромагнітних завад (стандарт IEC 6 1000-3-2) повинен обмежуватись 39 гармоніками, якщо потужність електрообладнання перевищує 75 Вт.

Ефективним шляхом подолання цих недоліків є переведення роботи силового ключа ІП у квазірезонансний режим [3; 4]. Силовий ключ у такому режимі вмикається та вимикається при нульовому струмі і має назву квазірезонансний імпульсний перетворювач, який перемикається при нульовому струмі (КРІП-ПНС). Фактично, це паралельний ІП, в який введено резонансний контур CkLk. Схема такого перетворювача наведена на рис.1, а його часові діаграми роботи — на рис.2.

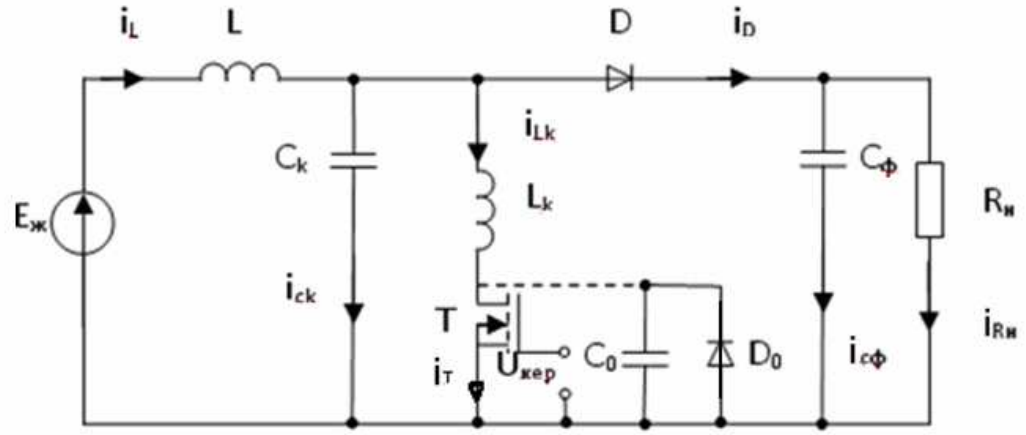


Рис. 1. Схема паралельного КРІП-ПНС

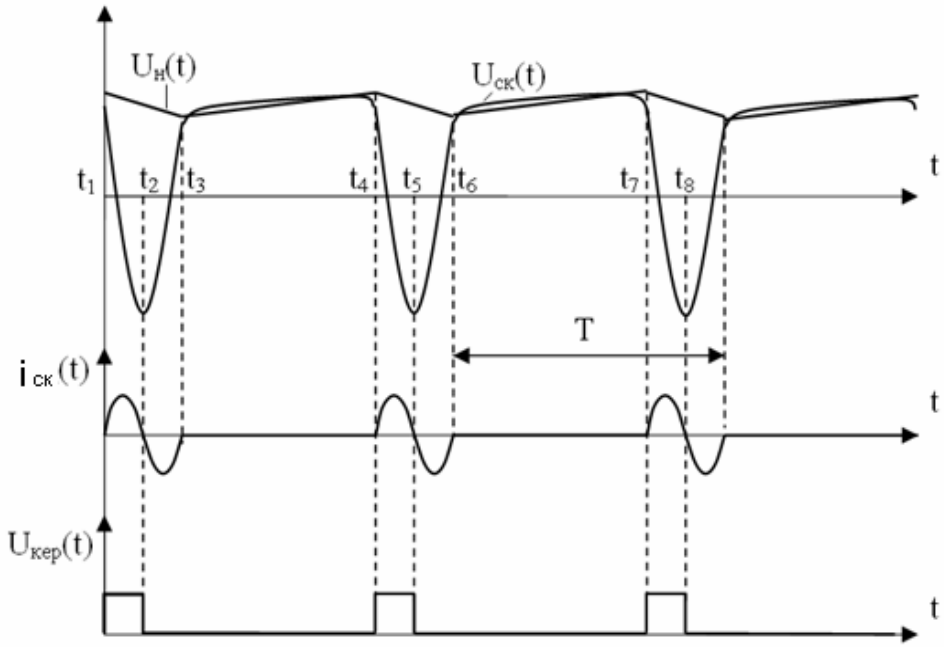


Рис. 2. Часові діаграми роботи КРІП-ПНС

Комутаційні процеси в паралельному КРІП-ПНС

У сталому режимі в роботі КРІП-ПНС можна виділити три етапи (рис. 2):

1) t1-t2 – перезаряд ємності Ск через силовий транзистор;

2) t2-t3 - перезаряд ємності Ск через зворотний діод D0;

3) t3-t4 – передача енергії від джерела живлення у навантаження.

На першому етапі при замиканні електронного ключа Т діод D попадає під від’ємну напругу:

$$UD=EЖ+UL(0)-UH. \quad (1)$$

На цьому етапі справедлива еквівалентна схема заміщення, що наведена на рис. 3.

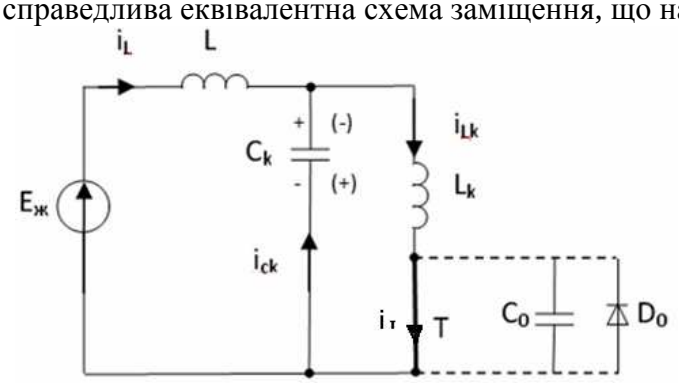


Рис.3. Схема заміщення КРІП-ПНС на першому комутаційному інтервалі

Резонансна ємність Ск перезаряджається через резонансну індуктивність Lк з частотою:

$$f_K = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_K C_K}}, \qquad (2)$$

якщо силовий транзистор вважати ідеальним ключем. У момент часу t2 струм контуру iLк=0, а напруга на Ск має мінімальне значення. В цей момент електронний ключ Т вимикається.

На другому етапі транзистор Т закритий (UCB=0), але конденсатор Ск перезаряджається через зворотний діод D0 (еквівалентна схема рис. 4). Ємність Ск буде перезаряджатися до полярності, яка вказана в дужках. У момент часу t3 струм резонансного контура LкСк буде дорівнювати нулю і діод D0 закриється від'ємною напругою UCB електронного ключа Т. Етапи резонансного коливання закінчуються. На перших двох етапах напруга на Rн буде підтримуватися напругою Сф, незначно зменшуючись за рахунок розряду Сф через Rн.

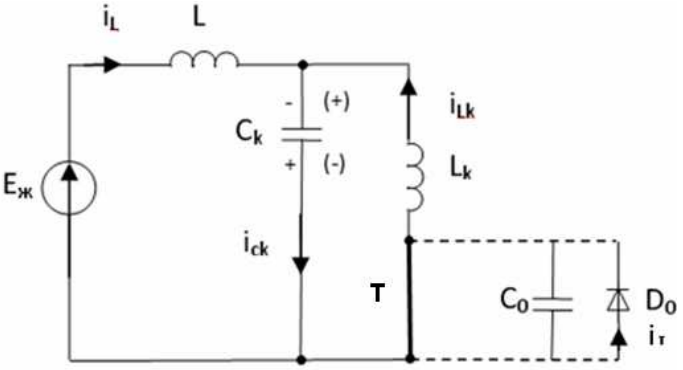


Рис.4. Схема заміщення КРІП-ПНС на другому комутаційному інтервалі

На третьому інтервалі електронний ключ Т закритий, у процесі перезаряду Ск його напруга досягне рівня UH і діод D відкривається (еквівалентна схема рис.5).

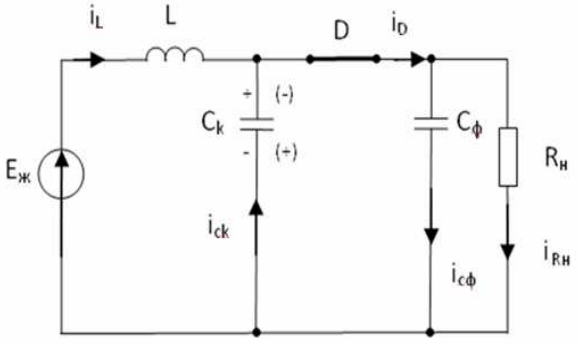


Рис.5. Схема заміщення КРІП-ПНС на третьому комутаційному інтервалі

На цьому інтервалі електромагнітна енергія, яку накопичено в дроселі L за два перших етапи, буде передаватись до навантаження. Змінюючи частоту перемикання транзистора Т, можна регулювати напругу на Rн, або стабілізувати її при наявності кола зворотного зв'язку.

Частота комутації транзистора обмежується частотою резонансного контуру, яка залежить не тільки від значень Lк та Ск , але і від реальних параметрів транзистора та навантаження.

Експериментальні дослідження КРІП-ПНС

Теоретично оцінити вплив паразитних параметрів транзистора Т, його нелінійного змінного опору в процесі перемикання та вплив навантаження на частоту коливань резонансного контуру проблематично.

У зв'язку з цим дослідження цих питань проведено експериментально на діючому макеті КРІП-ПНС, що має такі параметри своїх елементів: L = 1 мГн; Lк = 5,2 мкГн; Ск = 0,22 мкФ; діод MBR2045; транзистор IRF244; Еж = 15 В; Rн = 10÷200 Ом.

З часових діаграм (рис. 2) видно, що мінімальна тривалість імпульсу відкривання транзистора повинна дорівнювати половині періоду коливань резонансного контуру, який при відкритому діоді D буде зашунтований навантаженням.

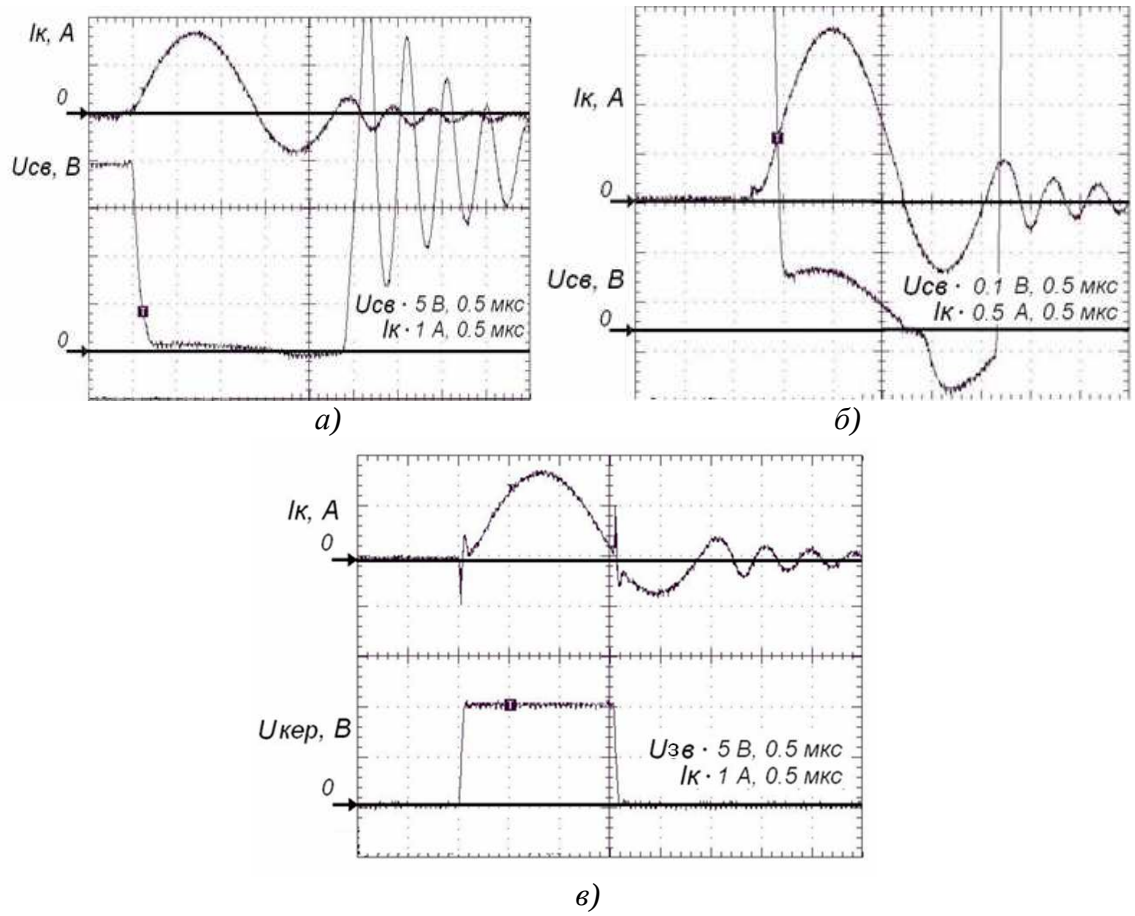


Рис.6. Осцилограми струму і напруги стік-витік та імпульсу керування в КРІП-ПНС

Зміни навантаження будуть суттєво впливати на добротність та частоту коливань резонансного контуру, що при постійній довжині імпульсу, який відкриває транзистор, буде призводити до порушення режиму нульового струму при його вимиканні. На рис. *6* наведені осцилограми, які показують вплив навантаження на частоту резонансного контуру. Так, при навантаженні Rн = 40 Ом; Rн = 100 Ом (осцилограми рис. *6*, *б*, *в*) інтервал, на якому транзистор проводить струм резонансного контуру, дорівнює довжині імпульсу, що вмикає транзистор.

При навантаженні Rн = 10 Ом, рис. *6, а*, такий режим відсутній, наслідком чого є зменшення ККД. Режим вимикання силового транзистора супроводжується коливальними процесами в контурах, які створені паразитними елементами схеми.

Частота цих коливань вища ніж частота резонансного контура LкСк. Це веде до підвищення високочастотних пульсацій у навантаженні та в спектрі вхідного струму КРІП-ПНС. Цей недолік відмічено в роботах [5; 6], де запропоновані схемні рішення для його подолання.

У процесі експериментальних досліджень отримані залежності довжини імпульсу вмикання транзистора від навантаження (рис. 7, 8) для різних частотних діапазонів його роботи. Отримані залежності дозволяють побудувати нечітку систему керування транзистором, яка дозволить зберегти режим нульового струму при його вимиканні в широкому діапазоні зміни навантаження [4].

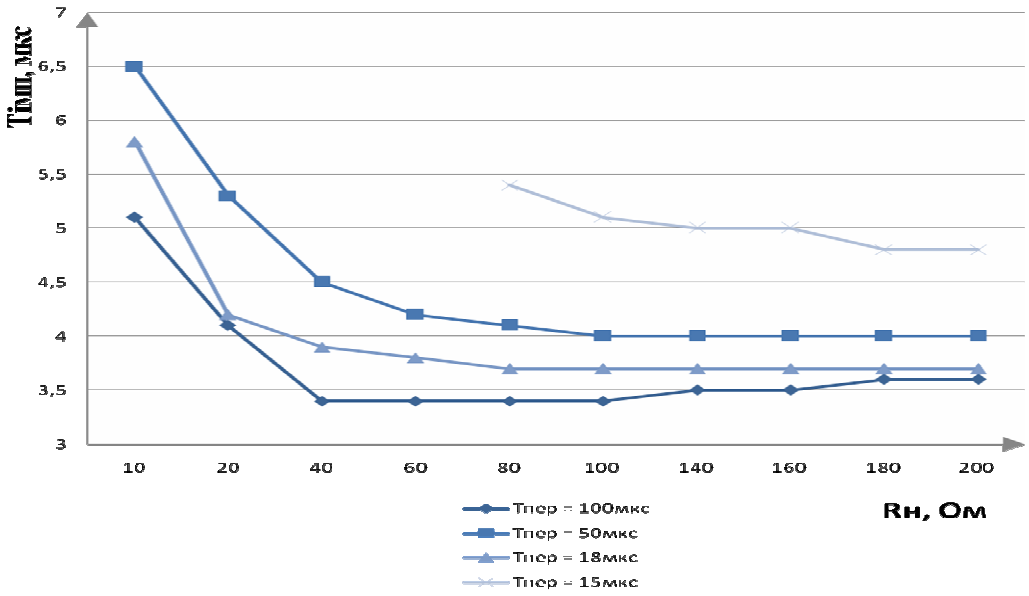


Рис.7 Залежність Тімп=f(Rн) для частот комутації ключа від 10 кГц до 75 кГц

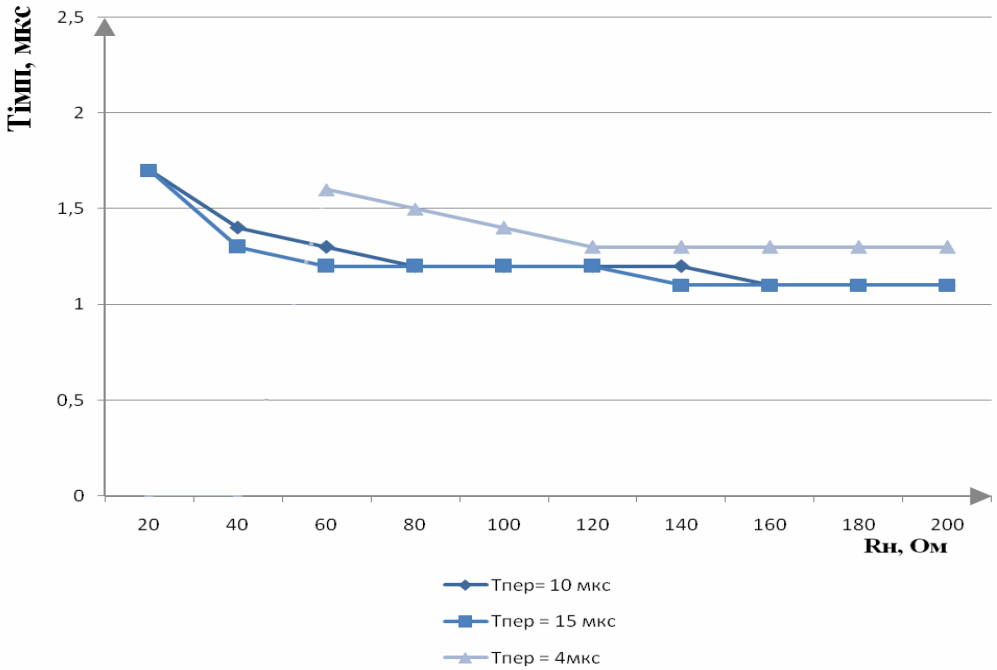


Рис.8. Залежність Тімп=f(Rн) для частот комутації ключа від 75 кГц до 250 кГц

Експериментальні регулювальні та зовнішні характеристики для різних частот перемикання наведені на рис. 9, 10.

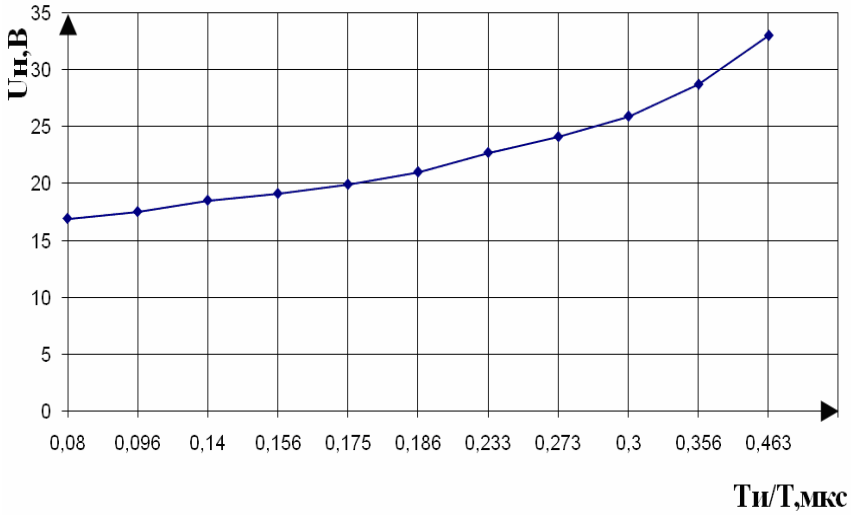


Рис. 9. Регулювальна характеристика КРІП-ПНС

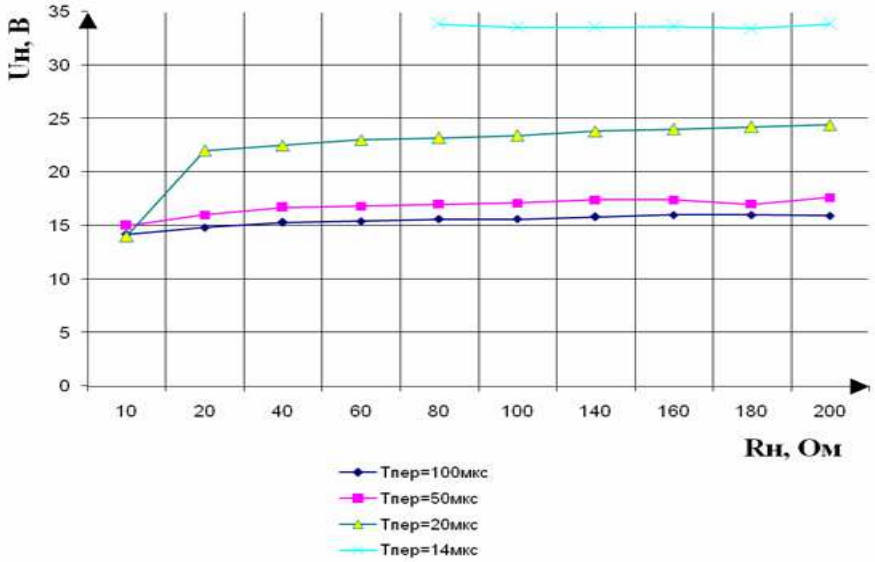


Рис. 10. Зовнішні характеристики КРІП-ПНС

Як видно з зовнішніх характеристик, вихідний опір КРІП-ПНС практично не залежить від частоти його роботи. При зменшенні Rн резонанс закінчується за рахунок шунтування малим Rн опору резонансного контура Rк. Це небажаний режим для КРІП-ПНС.

З регулювальної характеристики (рис.9) видно, що при шпаруватостях (γ<0,1) вихідна напруга КРІП-ПНС практично дорівнює Еж за рахунок збільшення часу розсіяння електромагнітної енергії, яка була запасена в L на етапі резонансу в Сф та Rн. При шпаруватостях, близьких до 0,5, вихідна напруга збільшується більше ніж в два рази. Регулювальна характеристика має значну не лінійність.

Висновки

1. Встановлена залежність тривалості імпульсу вмикання транзистора КРІП-ПНС від навантаження за умови збереження режиму нульового струму, що дозволяє побудувати відповідну систему керування на основі нечіткої логіки.
2. Встановлено, що зовнішня характеристика КРІП-ПНС має «жорсткий» характер, що створює сприятливі умови для стабілізації вихідної напруги, якщо шпаруватість управління знаходиться в діапазоні 0,1-0,5.

3. Експериментально встановлена наявність паразитних високочастотних коливань при вимиканні силового транзистора КРІП-ПНС, які впливають на діапазон регулювання вихідної напруги та на коефіцієнт її пульсацій.

Список використаних джерел

1. ON Semiconductor, “Power Factor Correction (PFC) Handbook- Choosing the Right Power Factor Control-ler Solution”, Rev. 2, Aug 2004.

2. Сертификация радиоэлектронной аппаратуры на соответствие требованиям электромагнитной совместимости/В. Семенов//Chip news. – 2004. – № 5. – С. 51-53.

3. Ли Ф.К. Высокочастотные квазирезонансные преобразователи. ТИИЭР / Ф. К. Ли // Тематический выпуск. «Энергетическая электроника» / под ред. В.А. Лабунцова. – М.: Мир. – Т. 76. – 1988. – № 4. – С. 83-97.

4. Стабилизаторы постоянного напряжения с широтно-импульсными и частотно-импульсными квазирезонансными преобразователями / Ю. А. Денисов. – Киев: Изд. Института электродинамики НАН Украины, 2001. – 146 с.

5. T. Firmansyah, E. Abe, S. Shoyama, M. Tomioka, S. Ninomiya “An active-clamped full-wave zero-current-switched quasi-resonant boost converter in power factor correction application”, Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2010, Twenty-Fifth Annual IEEE, February 25, p. 30.

6. S. Tomioka, S. Abe, M. Shoyama, T. Ninomiya, E. Firmansyah, “Zero-current-switched quasi-resonant boost converter in power factor correction application”, Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2009, Twenty-Fourth Annual IEEE, February 6, p. 11.

УДК 504.054

А.О. Квицинський, канд. техн. наук
І.О. Майстренко, інженер
Відокремлений підрозділ «Науково-технічний центр електроенергетики» НЕК «Укренерго», м. Київ, Україна

ПРОГНОЗУВАННЯ МАСШТАБІВ ЗАРАЖЕННЯ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ НАСЕЛЕНИХ МІСЦЬ ЕЛЕГАЗОМ І ПРОДУКТАМИ ЙОГО РОЗКЛАДАННЯ

Проаналізовано можливі масштаби зараження атмосферного повітря елегазом і продуктами його розкладання і встановлено, що у разі нормальної роботи елегазового електрообладнання перевищення гранично допустимих концентрацій елегазу та продуктів його розкладання не відбувається.

Елегаз успішно використовувався в електроенергетиці в силовому обладнанні для передавання та розподілення електричної енергії (розподільні установки високої та середньої напруги, елегазові підстанції, головні вимикачі замкненої мережі, автоматичні вимикачі, трансформатори, кабелі). Це синтетичний газ, утворений шістьома атомами фтору, зібраними навколо атома сірки, розташованого в центрі. Хімічний зв’язок між фтором і сіркою відомий як один із найстабільніших існуючих атомних зв’язків. Шість таких зв’язків надають молекулі дуже високої хімічної та термічної стійкості.

У процесі нормальної експлуатації під дією електричної дуги в обладнанні, де міститься елегаз, атоми фтору відриваються, утворюється безліч радикалів, іонів або нейтральних молекул, залежно від типу збудження та підведеної потужності. Коли підведення енергії припиняється, більшість атомів перегруповуються, щоб сформувати молекулу елегазу, у той час як деякі з них комбінуються з іншими речовинами, для утворення низки стабільних кінцевих продуктів.

Під час розкладання елегазу частковими розрядами, проміжними продуктами є фрагменти елегазу SF5, SF4 і F, що сполучаються з киснем і водою, утворюючи сполуки, в основному – HF, SO2, SOF2, SOF4 і SO2F2. Завдяки низькій енергії часткових розрядів накопичені кількості цих сполук зазвичай є дуже незначними. Кількість цих побічних

продуктів визначають за кількістю операцій комутації, конструкцією обладнання та використанням адсорбентів (тверді адсорбенти, молекулярні сита). Газонаповнені відсіки комутаційної апаратури можуть також містити матеріальні частинки і металевий пил, що утворюються внаслідок тертя контактів і комутаційної електроерозії.

У разі вдихання деяких продуктів розкладання елегазу у високих концентраціях виникає подразнення слизової оболонки та нудота. Однак завдяки сильному запаху, наявність цих газів можна розпізнати навіть при дуже низькій концентрації, коли вони ще не становлять небезпеки для здоров'я.

Елегазове обладнання не є організованим джерелом викиду хімічних чинників у повітря населених місць; останні можуть з'являтися лише під час аварійних ситуацій. Наявність продуктів розкладання елегазу є важливим лише у разі потрапляння їх у повітря робочої зони чи атмосферне повітря. Їхні концентрації в комплектній розподільній установці не мають ніякого прямого значення, особливо, якщо в газонаповненому відсіку наявні адсорбенти, які очищують елегаз.

Елегаз може бути наявним у атмосфері населених місць, а також у повітрі робочої зони приміщення комплектної розподільної елегазової установки внаслідок експлуатаційного витоку (до 0,5 % від загальної кількості елегазу протягом року) або аномального витоку, коли руйнується газонепроникний корпус чи коли він не може вмістити весь газ, і газ із елегазових електроустановок викидається назовні через запобіжний клапан (наприклад – у разі внутрішнього пробою).

Оцінюючи ризик для здоров'я людини, необхідно чітко розрізняти стан експлуатаційного витоку і ситуацію внутрішнього пробою, що призводить до раптового викиду значної кількості використовуваного елегазу в повітря.

У разі експлуатаційного витоку необхідно розглядати вплив довгострокової експозиції газоподібних продуктів розкладання елегазу. Концентрації цих продуктів у повітрі мають залишатися досить низькими, щоб не становити ніякої загрози незахищеному персоналу впродовж звичайного робочого періоду.

Наднормативний витік може бути спричинено як механічним пошкодженням компонентів чи герметизації стиків, так і механічним пошкодженням, викликаним аномальним ударним навантаженням. У разі раптового викиду елегазу з обладнання внаслідок внутрішнього пробою, необхідно розглядати вплив миттєвої експозиції. У цьому разі необхідно евакуювати персонал і провентилювати приміщення, а також негайно вжити відповідних коригувальних заходів із локалізації та усунення витоку.

Експлуатаційні та аномальні витоки використовуваного елегазу з обладнання є небажаними. Допустиме значення експлуатаційного витоку газу з елегазових електроустановок високої напруги становить 0,5 % на рік на газонаповнений відсік, а з обладнання середньої напруги – 0,1 %.

Під час проведення розрахунків на основі матеріальних балансів брали до уваги те, що газ витоків з елегазових електроустановок являє собою суміш хімічних сполук: гексафториду сірки (95 %), фтороводню (2,5 %), сірчистого ангідриду (2 %), фториду алюмінію (0,5 %).

Прогнозування масштабів можливого зараження атмосферного повітря населених місць унаслідок експлуатаційного витоку газу з елегазових електроустановок у разі нормальної роботи було проведено відповідно до РД 52.04.212-86 (ОНД-86) "Методика розрахунку концентрацій в атмосферному повітрі шкідливих речовин, що містяться в викидах підприємств" та РД 52.04.253 "Метод прогнозування масштабів забруднення сильнодіючими отруйними речовинами при аваріях (руйнуваннях) на хімічно небезпечних об'єктах і транспорті".

Розрахунок показав, що ризик для здоров'я внаслідок експлуатаційного витоку газу з елегазових електроустановок на електроенергетичних об'єктах, в яких міститься до

5 т елегазу, відсутній. Розраховані концентрації елегазу набагато нижчі від встановлених норм.

Прогнозування масштабів можливого зараження атмосферного повітря населених місць у разі внутрішнього короткого замикання з неконтрольованим виникненням електричної дуги і розгерметизацією відсіку здійснювали відповідно до вимог РД 52.04.253.

Під час прогнозування можливої зони зараження брали до уваги те, що відбувається одночасний викид сумарного запасу шкідливої речовини. Метеорологічні умови: інверсія, швидкість вітру – 1 м/с. Для розрахунку використовували відомі лінійні залежності та розглядали тільки ту кількість елегазу, що міститься в найбільшому газонаповненому відсіку. Це обґрунтовується тим, що два або більше газонаповнених відсіків не можуть одночасно бути зруйнованими. Також було враховано, що у разі внутрішнього короткого замикання з неконтрольованим виникненням електричної дуги та розгерметизацією відсіку вміст чистого елегазу в суміші може зменшуватися до 90 %.

Результати прогнозування можливої зони зараження, залежно від кількості елегазу в найбільшому газонаповненому відсіку, наведено на рисунку 1.

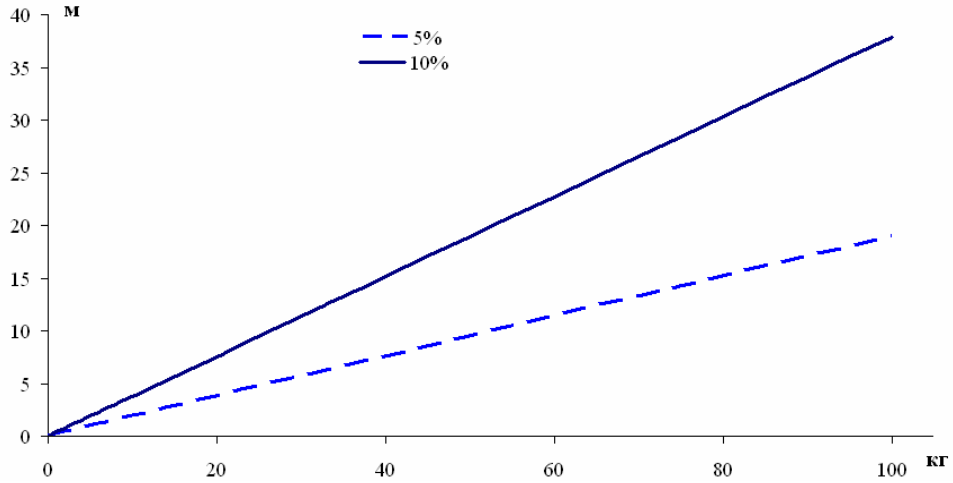


Рис. 1. Зона можливого зараження атмосферного повітря населених місць у разі внутрішнього короткого замикання з неконтрольованим виникненням електричної дуги або розгерметизацією відсіку

Маса елегазу в найбільшому відомому газонаповненому відсіку становить 92 кг. Таким чином, можна стверджувати, що для нього максимальна межа зони зараження буде знаходитися на відстані 35 м від обладнання.

Висновки

1. Побудовано модель дифузії елегазу в атмосферному повітрі у разі аномального витоку, яка підтвердила наведені вище дані.
2. Використання гексафториду сірки в електрообладнанні пов’язане з незначним впливом на місцеве навколишнє середовище та екосистему. Проте ситуація залишатиметься такою лише за умови належної уваги з боку користувачів обладнання, що містить елегаз.
3. У разі нормальної роботи елегазових електроустановок перевищення гранично допустимих концентрацій елегазу та продуктів його розкладання від дії електричної дуги в повітрі робочої зони та атмосферному повітрі населених місць унаслідок експлуатаційного витоку не відбувається.
4. У випадках внутрішнього пробою у відсіку з порушенням цілісності його оболонки, яке призводить до раптового викиду значної кількості використовуваного елегазу в повітря, максимальна межа зони зараження буде знаходитися на відстані 35 м від об-

ладнання. В цих випадках системою організаційних і технічних заходів можна убезпечити життя і здоров'я обслуговуючого персоналу.

Список використаних джерел

1. B. Belmadani, et al., SF6 decomposition under power arcs, physical aspects, IEEE Trans, on Elec. Ins., Vol. 26, No. 6, 1991.
2. S. Wartmann and J. Harnisch, Reductions of SF6 emissions from high and medium voltage electrical equipment in Europe, Ecofys GmbH, Nurnberg, Germany, 2005.
3. K. Yokotsu, Y. Ichikawa et al., Recent practice for huge reduction of SF6 gas emission from GIS & GCB in Japan, CIGRE SC A3 & B3 Joint Colloquium and Tutorial in Japan, 26th - 28th Sep 2005, Tokyo, Japan, 2005.
4. IEC/TR 62271-303(2008) − High-voltage switchgear and controlgear - Part 303: Use and handling of sulphur hexafluoride (SF6).
5. IEC 60480 (2004) − Guidelines for the checking and treatment of sulfur hexafluoride (SF6) taken from electrical equipment and specification for its re-use.

ОСНОВНІ ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ ТА ПОДАЧІ РУКОПИСІВ НАУКОВИХ СТАТЕЙ ДО "ВІСНИКА ЧЕРНІГІВСЬКОГО ДЕРЖАВНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ" СЕРІЯ "ТЕХНІЧНІ НАУКИ"

Вимоги щодо підготовки рукописів статей для публікації у "Віснику Чернігівського державного технологічного університету" (далі Вісник ЧДТУ) (внесено до Переліку наукових фахових видань ВАК України, затвердженого Постановою Президії ВАК України від 10 березня 2010 р. № 1-05/2, бюлетень ВАК України № 4, 2010), розроблені з урахуванням Постанови Президії ВАК від 15.01.2003 р. № 7-05/1.

Шановні дописувачі!

Спочатку просимо надіслати Вашу статтю, оформлену за наведеними нижче вимогами, для попереднього розгляду редакційною колегією "Вісника Чернігівського державного технологічного університету" серія "Технічні науки". Після отримання позитивного відгуку прохання сплатити вартість статті і надсилати весь пакет документів до науково-дослідної частини ЧДТУ.

1. Для публікації статті у "Віснику Чернігівського державного технологічного університету" серія "Технічні науки" до науково-дослідної частини ЧДТУ необхідно в обов'язковому порядку подати:

– заяву на ім'я ректора з проханням опублікувати наукову статтю (для науковців з інших ВНЗ) за встановленою формою (додаток А);

– зовнішню (підписану не працівниками ЧДТУ) рецензію на статтю за підписом доктора наук;

– витяг із протоколу засідання кафедри чи лабораторії або наукового підрозділу, що рекомендує статтю до друку;

– довідку про авторів, складену за наведеною формою (додаток Б);

– роздрукований текст статті, оформленої за зразком (додаток Д);

– електронний варіант статті;

– реферат на трьох мовах (українська, російська, англійська) (додаток В);

– квитанцію про сплату вартості публікації наукової статті (додаток Г).

2. Вимоги до наукової статті. Наукова стаття повинна відповідати тематичному спрямуванню збірника і бути завізована власноручно на першій сторінці підписом автора.

Обсяг статті повинен бути наступним: мінімум – 5 повних сторінок, максимум – 10 сторінок (остання сторінка має бути заповнена не менш ніж на 3/4).

Стаття подається у роздрукованому вигляді. Разом з текстом статті, який набирається з використанням комп'ютерних текстових редакторів Word for Windows 97/2000/XP, подається її електронна версія на оптичному диску CD (DVD) або надсилається електронною поштою на адресу: nachbm@mail.ru.

3. Структура статті. До друку у "Віснику Чернігівського державного технологічного університету" серія "Технічні науки" приймаються лише наукові статті, які мають такі необхідні елементи: УДК; Автори; Назва наукової або освітньої установи, де працюють автори; Назва статті; Анотація; Постановка проблеми; Аналіз останніх досліджень і публікацій; Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми; Мета статті; Виклад основного матеріалу; Висновки і пропозиції; Список використаних джерел.

4. Параметри сторінки повинні бути наступними:

Формат А4 (210 мм×297 мм)

– поля верхнє, нижнє та бокові – 25 мм;

– відступ від верхнього та нижнього колонтитула – 25 мм.

Верхній і нижній колонтитули, а також номери сторінок не вводити. Текст повинен бути вирівняний по ширині аркуша.

5. Вимоги до анотації. В анотації має бути чітко сформульована головна ідея статті та коротко обґрунтована її актуальність (обсяг до 8-10 рядків). У статті подаються анотації трьома мовами: українською, російською, англійською.

КАТЕГОРИЧНО ЗАБОРОНЯЄТЬСЯ У СТАТТІ ВИКОРИСТАННЯ АВТОМАТИЧНОЇ РОЗТАНОВКИ ПЕРЕНОСІВ ТА АВТОМАТИЧНИХ СПИСКІВ. ВСІ СПИСКИ ПРОСТАВЛЯЮТЬСЯ У РУЧНОМУ РЕЖИМІ!

6. Вимоги до оформлення структурних елементів статті.

6.1. *УДК* – шрифт Times New Roman (кегель 12), курсив, вирівнювання по лівому краю без абзацу.

Автори – ***ініціали та прізвище*** кожного автора починати з нового рядка (шрифт Times New Roman (кегель 12), розміщення по лівому краю, без абзацного відступу, напівжирний), ***науковий ступінь і посада*** (шрифт Times New Roman (кегель 12), звичайний). Скорочення наукових ступенів подавати згідно з ДСТУ 3582-97 “Скорочення слів в українській мові у бібліографічному описі. Загальні правила та вимоги”.

Назва організації – місця роботи автора (-ів) (вирівнювання по лівому краю без абзацного відступу, шрифт Times New Roman (кегель 10)). Після назви організації через кому вказуються місто та країна розміщення організації.

Назва статті – шрифт Times New Roman (кегель 12). Подається прописними напівжирними літерами, вирівнювання по центру без абзацу.

Анотація – шрифт Times New Roman (кегель 10), курсив, вирівнювання по ширині, абзацний відступ 0,63 см, одинарний інтервал.

Ключові слова – шрифт Times New Roman (кегель 10), вирівнювання по ширині, абзацний відступ 0,63 см, одинарний інтервал.

Основний текст – текст статті з заголовками (вирівнювання по ширині, абзац – 0,63 см, шрифт Times New Roman (кегель 12), одинарний інтервал) (додаток Д).

Розділи статті (Постановка проблеми; Аналіз останніх досліджень і публікацій; Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми; Мета статті; Виклад основного матеріалу; Висновки і пропозиції) зазначаються наступним шрифтом: Times New Roman, кегель 12, напівжирний, звичайний. Після назви розділу статті ставиться крапка і продовжується текст самої статті.

6.2. Інтервали між елементами статті такі:

– УДК – автори – 1;

– автори – назва організації – 1

– назва організації – назва статті – 2;

– назва статті – анотація – 1;

– анотація – ключові слова – 1;

– ключові слова – основний текст – 1;

– основний текст – назва таблиці (верхній край рисунка, схеми, діаграми) – 1;

– назва таблиці – її верхній край (нижній край рисунка, діаграми – їхні назви) – 1;

– нижній край таблиці (назва рисунка, діаграми, схеми) – основний текст – 1;

– основний текст – список використаних джерел – 1;

– список використаних джерел – перелік літератури – 1.

Приклад оформлення статті:

УДК 621.3.05

О.В. Будьонний, канд. техн. наук
М.А. Прокопець, магістрант
Є.Ю. Коваленко, магістрант

НТУУ «КПІ», м. Київ, Україна

БЕЗКОНТАКТНА ЗАРЯДКА АКУМУЛЯТОРНИХ БАТАРЕЙ

Пропонується використання безконтактного заряду акумуляторних батарей на основі теорії теслівських процесів для передачі енергії без дротів на невеликі відстані. Розрахунок енергетичних параметрів схеми передачі енергії проводився методом часткових ємностей між передавальними та приймальними антенами з урахуванням крайових ефектів. Проведено аналіз залежності струму та напруги навантаження від таких факторів: зміщення розташування пристрою, який заряджається, відносно центру блоку підзарядки; відстані між передавальними та приймальними антенами; значення індуктивності в навантаженні; робочої частоти.

Ключові слова: безконтактна зарядка, батареї, процеси, енергія

7. Цитати, таблиці, статистичні дані, цифрові показники, що підвищують рівень аналітичних матеріалів, подаються з посиланням на джерела. Таблиці мають бути пронумеровані й мати заголовок. Відповідальність за наведені показники несе автор.

Рисунки і таблиці необхідно подавати в статті безпосередньо після тексту, де вони згадані вперше, або на наступній сторінці.

7.1. Ілюстрації (рисунки та чорно-білі фотографії)

При виконанні рисунків рекомендується використання Microsoft Visio 2007 (2003). За умови використання закладеної графіки Microsoft Word рисунки повинні бути згрупованими. Шрифт рисунків Times New Roman, кегель 12, курсив.

Рисунки позначають словом “Рис.” і нумерують послідовно в межах статті. Номер рисунку, його назва і пояснювальні підписи розміщують послідовно під ілюстрацією.

Наприклад: *Рис. 1. Робоча характеристика екструдера*

7.2. Таблиці

Цифровий матеріал, що наводиться в статті, як правило, повинен оформлятися у вигляді таблиць.

Розмір тексту таблиць – кегель 12. Усі таблиці повинні мати заголовки. Нумераційний заголовок таблиць (кегель 12) вирівнюють по правому краю таблиці, тематичний заголовок таблиці (по центру, кегель 12, курсив).

Наприклад:

Таблиця 1

Граничні значення режимів різання

№ досл.	$V_к$, м/с	$V_{дет}=V_к/60$	t, мм	$Q_{гр}$, мм^2/с	a_z, мкм	$a_{z\ max}$	$n/n_{різ}$
1	20	333	0.033	11	5,32	10.17	10/6
2	40	667	0,033	13	3.04	5.83	11/7
3	60	1000	0,028	18	2.01	3.78	15/10
4	80	1333	0,026	26	1.64	3.07	19/12
5	90	1500	0,025	38	1.59	2.84	25/16

Якщо таблиця не вміщується на одній сторінці, всі її колонки нумерують, а над перенесеною частиною таблиці зліва надписують: “Продовження таблиці 1”.

7.3. Формули

При використанні формул необхідно дотримуватися певних правил.

Найбільші, а також довгі і громіздкі формули, котрі мають у складі знаки суми, добутку, диференціювання, інтегрування, розміщують на окремих рядках. Це стосується також і

всіх нумерованих формул. Для економії місця кілька коротких однотипних формул, відокремлених від тексту, можна подати в одному рядку, а не одну під одною. Невеликі і нескладні формули, що не мають самостійного значення, вписують усередині рядків тексту.

Стиль формул: хімічні формули набирають прямим шрифтом. Формули, на які є посилання, нумерують арабськими цифрами в круглих дужках праворуч. Обов'язково подають розшифровку літерних позначень величин у формулах. Для набору позначень фізичних величин використовують редактор формул Microsoft Equation для "WINDOWS": 1) змінні, латинські літери – курсив, Times New Roman; 2) функції, цифри, українські літери – курсив, Times New Roman; 3) матриці, вектори – курсив, Times New Roman; 4) грецькі літери, символи – курсив, Symbol; 5) розміри: звичайний 11 пт, великий індекс 7 пт, малий індекс 6 пт, великий символ 14 пт, малий символ 11 пт.

Номер формули проставляється справа в кінці рядка, в круглих дужках, не виходячи на поле. Формули розташовуються по центру сторінки. Між ними та текстом витримується інтервал в один рядок.

Наприклад:

Пропонується зношення круга визначати пропорційним кількості зрізів більших граничного значення $(a_z)_{max}$:

$$Q_a(a_z) = C_1 \cdot a_z^{k_1} \cdot F(a_z) + C_2 \cdot a_z^{k_2} (1 - F(a_z)), \quad (13)$$

де $k_1<1$, $k_2>1$ – показники ступенів при товщині зрізу.

$F(a_z)$, $(1–F(a_z))$ – значення інтегральної функції розподілення розрахункової товщини зрізів, котрі визначають частку товщини зрізів, менших та більших вказаного граничного значення a_z. Інтегральна функція розподілу ймовірностей товщини стружок була знайдена за моделлю процесу шліфуваня в роботі [7].

8. Список використаних джерел складається за ДСТУ ГОСТ 7.1:2006 "Система стандартів з інформації, бібліотечної та видавничої справи. Бібліографічний запис. Бібліографічний опис. Загальні вимоги та правила складання (ГОСТ 7.1–2003, IDT)".

Заголовок "Список використаних джерел" поміщається посередині рядка, шрифт Times New Roman, кегель 10, напівжирний.

НЕ ДОЗВОЛЯЄТЬСЯ У СПИСКУ ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ЗАЗНАЧАТИ ЛИШЕ АДРЕСУ САЙТІВ, ВОНИ ПОВИННІ БУТИ ОФОРМЛЕНІ ЗГІДНО З ГОСТом.

9. Оплата публікації. Опублікування наукових статей у "Віснику Чернігівського державного технологічного університету" серія "Технічні науки" є платним. Вартість публікації 1 сторінки наукової статті складає **30 грн.** (прохання обов'язково уточнювати вартість публікації). Оплата здійснюється за допомогою квитанції, що наведена у додатку Г.

10. Контактна інформація.

Матеріали необхідно надсилати за адресою: 14027, м. Чернігів, вул. Шевченка, 95, корп. 1, к. 242 (науково-дослідна частина). Всі документи, що містять підписи та печатки, повинні бути відсканованими.

Контактні особи:

Подимова Людмила Анатоліївна

Робочий тел.: 0462-34244

E-mail: nachbm@mail.ru.

Відповідальність за матеріали, наведені у статті, несе автор. Неправильно оформлені автором стаття та супровідні документи, що не відповідають зазначеним вимогам, розглядатися не будуть.

Додаток А

Зразок заяви на ім'я ректора

бланк установи

Ректору Чернігівського державного технологічного університету,
д-ру екон. наук, проф. Шкарлету С.М.

Заява

Прошу Вас надати можливість опублікувати статтю "(назва статті)" авторів (зазначаються вчені ступені, вчені звання, прізвища та ініціали авторів) у "Віснику Чернігівського державного технологічного університету" серія "Технічні науки".

Посада керівника наукового або навчального закладу, науковий ступінь, наукове звання	підпис м. п.	ініціали та прізвище

Додаток Б

Форма для оформлення довідки про автора

ДОВІДКА ПРО АВТОРІВ

Прізвище		
Ім’я		
По батькові		
Науковий ступінь		
Вчене звання		
Почесне звання		
Місце роботи		
Посада		
Назва статті		
Обсяг статті		
Поштова адреса		
Контактна інформація	роб. тел.	
	дом. тел.	
	моб. тел.	
	e-mail	
Дата і підпис автора		

Додаток В

Приклад оформлення реферату до статті

УДК 621.3.05

О.В. Будьонний, М.А. Прокопець, Є.Ю. Коваленко. БЕЗКОНТАКТНА ЗАРЯДКА АКУМУЛЯТОРНИХ БАТАРЕЙ.

Пропонується використання безконтактного заряду акумуляторних батарей на основі теорії теслівських процесів для передачі енергії без дротів на невеликі відстані. Розрахунок енергетичних параметрів схеми передачі енергії проводився методом часткових ємностей між передавальними та приймальними антенами з урахуванням крайових ефектів. Проведено аналіз залежності струму та напруги навантаження від таких факторів: зміщення розташування пристрою, який заряджається, відносно центру блоку підзарядки; відстані між передавальними та приймальними антенами; значення індуктивності в навантаженні; робочої частоти.

Ключові слова: безконтактна зарядка, батареї, процеси, енергія.

УДК 621.3.05

А.В. Буденный, М.А. Прокопец, Е.Ю. Коваленко. БЕСКОНТАКТНАЯ ЗАРЯДКА АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ.

Предлагается использование бесконтактного заряда аккумуляторных батарей на основе теории тесловских процессов для передачи энергии без проводов на небольшие расстояния. Расчет энергетических параметров схемы передачи энергии проводился методом частичных емкостей между передаточными и приемными антеннами с учетом краевых эффектов. Проведен анализ зависимости тока и напряжения нагрузки от таких факторов: смещение расположения устройства, которое заряжается, относительно центра блока подзарядки; расстояния между передаточными и приемными антеннами; значение индуктивности в нагрузке; рабочей частоты.

Ключевые слова: бесконтактная зарядка, батареи, процессы, энергия.

УДК 621.3.05

A.V. Budenny, M.A. Prokopets, E.U. Kovalenko. NONCONTACT CHARGING OF STORAGE BATTERIES.

The use of noncontact charge of storage batteries is offered on the basis of theory of Tesla processes for the transmission of energy without wires on small distances. The calculation of power parameters of chart of transmission of energy was conducted the method of partial capacities between transmission and receiving aerials taking into account edge effects. The analysis of dependence of current and tension of loading is conducted from such factors: displacement of location of device, what recharging, in relation to the center of subcharging block; distances are between transmission and receiving aerials; a value of inductance is in loading; working frequency.

Keywords: noncontact charge, batteries, processes, energy.

Додаток Г

Квитанція для оплати публікації

Заява на переказ готівки

Дт **1002** Ідентифікаційний код

Кт 31250273210037 05460798

Одержувач платежу Чернігівський державний технологічний університет

Дата здійснення операції

Дата валютування

Код установи банку 853592

Найменування установи банку ГУДК. Укр. в Чернігівській області

Прізвище, ім'я, по-батькові платника

Адреса платника

Призначення платежу за видання у збірнику 25010200

Сума

Загальна сума

(словами)

Підпис платника

Касир

Квитанція

Дт **1002** Ідентифікаційний код

Кт 31250273210037 05460798

Одержувач платежу Чернігівський державний технологічний університет

Дата здійснення операції

Дата валютування

Код установи банку 853592

Найменування установи банку ГУДК. Укр. в Чернігівській області

Прізвище, ім'я, по-батькові платника

Адреса платника

Призначення платежу за видання у збірнику 25010200

Сума

Загальна сума

(словами)

Підпис платника

Касир

Додаток Д

Приклад оформлення статті

УДК 621.3.05

О.В. Будьонний, канд. техн. наук
М.А. Прокопець, магістрант
Є.Ю. Коваленко, магістрант
НТУУ «КПІ», м. Київ, Україна

БЕЗКОНТАКТНА ЗАРЯДКА АКУМУЛЯТОРНИХ БАТАРЕЙ

Пропонується використання безконтактного заряду акумуляторних батарей на основі теорії тесліівських процесів для передачі енергії без дротів на невеликі відстані. Розрахунок енергетичних параметрів схеми передачі енергії проводився методом часткових ємностей між передавальними та приймальними антенами з урахуванням крайових ефектів. Проведено аналіз залежності струму та напруги навантаження від таких факторів: зміщення розташування пристрою, який заряджається, відносно центру блоку підзарядки; відстані між передавальними та приймальними антенами; значення індуктивності в навантаженні; робочої частоти.

Ключові слова: *безконтактна зарядка, батареї, процеси, енергія.*

Предлагается использование бесконтактного заряда аккумуляторных батарей на основе теории тесловских процессов для передачи энергии без проводов на небольшие расстояния. Расчет энергетических параметров схемы передачи энергии проводился методом частичных емкостей между передаточными и приемными антеннами с учетом краевых эффектов. Проведен анализ зависимости тока и напряжения нагрузки от таких факторов: смещение расположения устройства, которое заряжается, относительно центра блока подзарядки; расстояния между передаточными и приемными антеннами; значение индуктивности в нагрузке; рабочей частоты.

Ключевые слова: *бесконтактная зарядка, батареи, процессы, энергия.*

The use of noncontact charge of storage batteries is offered on the basis of theory of Tesla processes for the transmission of energy without wires on small distances. The calculation of power parameters of chart of transmission of energy was conducted the method of partial capacities between transmission and receiving aerials taking into account edge effects. The analysis of dependence of current and tension of loading is conducted from such factors: displacement of location of device, what recharging, in relation to the center of subcharging block; distances are between transmission and receiving aerials; a value of inductance is in loading; working frequency.

Keywords: *noncontact charge, batteries, processes, energy.*

Постановка проблеми. …
Аналіз останніх досліджень і публікацій. …
Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. …
Мета статті. Головною метою цієї роботи є …
Виклад основного матеріалу. …
Висновки і пропозиції. …

Список використаних джерел

1. Режим доступу: http://www.guardian.co.uk/technology/2006/nov/02/news.egovernment.
2. Ландау Л. Д. Электродинамика сплошных сред / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц // Теоретическая физика. Том 8. – М.: Наука, 1982. – 622 с.
3. Пентегов И. В. О возможности беспроводной передачи энергии с помощью тесловских процессов / И. В. Пентегов, А. Л. Приступа // Техническая электродинамика. – 2005. – № 3. – С. 11-15.
4. ….
5. ….

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

ВІСНИК

ЧЕРНІГІВСЬКОГО ДЕРЖАВНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ

СЕРІЯ «ТЕХНІЧНІ НАУКИ»

НАУКОВИЙ ЗБІРНИК

№ 1(55)

Головний редактор	В.В. Казимир
Відповідальний за випуск	О.І. Пилипенко
Літературний редактор	Л.М. Сила
Коректор	О.С. Смєлова
Комп'ютерна верстка і макетування	В.М. Олефіренко
	Т.В. Коваленко
	С.В. Козловський

Підписано до друку 01.03.12. Формат 60х84/8. Друк різограф.
Гарнітура Tames New Roman. Умов. друк. арк. – 29,88. Обл.-вид. арк. – 13,7.
Тираж 300 пр. Замовлення № 36/12.

Редакційно-видавничий відділ Чернігівського державного технологічного університету
14027, Україна, м. Чернігів, вул. Шевченка, 95
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру України суб'єктів
видавничої справи ДК № 840 від 04.03.2002 р.