

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ЕНЕРГЕТИКА

економіка, технології, екологія

Науковий журнал

№ 2 (56) - 2019

Виходить 4 рази на рік
Заснований у березні 2000 року

Енергетика сталого розвитку
Smart Grid системи та технології
Лібералізовані ринки енергії
Технології та обладнання в енергетиці
Енергетичний менеджмент та аудит
Енергетичні системи та комплекси
Екологічні проблеми в енергетиці

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2019

Головний редактор – Ю.І. Якименко

Заступники

головного редактора – С.П. Денисюк, О.С. Яндульський, Є.М. Письменний

Відповідальний секретар – О.О. Закладний

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ: А.О. Авраменко, Б.І. Басок, О.Ф. Буткевич, О.О. Вовк,
(Україна) А.В. Волошко, Г.О. Воропаєв, В.І. Дешко, В.Я. Жуйков,
С.О. Кудря, А.В. Носовський, М.Я. Островерхов,
С.М. Пересада, В.А. Попов, К.К. Ткачук, В.О. Туз,
О.Ю. Черноусенко, С.П. Шевчук, В.Ф. Шинкаренко

ЗАКОРДОННІ ЧЛЕНИ

РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ: Е. Хандшин (*Дортмундський технічний університет, інститут енергетичних систем та економіки енергетики, Німеччина*), Ричард Стржелецькі (*Інститут електротехніки, Варшава, Польща*), П.Я. Екель (*Папський католицький університет Мінас Жерайс, Бразилія*), А.В. Кузнецов (*Університет штату Північна Кароліна, США*), В.І. Олещук (*Інститут енергетики Академії Наук Молдови*), О.В. Кузнецов (*Університет прикладних наук, Німеччина*), Карлос Ф. Пфайфер (*Університетський коледж Південно-Східної Норвегії*), А. Башкіс (*Вільнюський технічний університет ім. Гедимінаса, Литва*), Опітс Йоахім (*Інститут енергетики м. Хамм, Німеччина*), В.М. Постолатий (*Інститут енергетики Академії Наук Молдови*), Рошан Шарма (*Університет Південно-Східної Норвегії*).

Технічний секретар Н.О. Кравчук.

Веб-сайт журналу <http://energy.kpi.ua>

Журнал зареєстровано Реєстраційний номер Свідоцтва про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації КВ №22857-12775ПР від 14.06.2017 р.

Журнал внесено до Переліку фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук відповідно до рішення Атестаційної колегії МОН України від 13 грудня 2016 р., затверджене наказом МОН України № 1604 від 22 грудня 2016 р. Журнал включено до баз даних «Наукова періодика України» НБУВ, Google Scholar, Index Copernicus, WorldCat, BASE, OpenAIRE, PИHЦ, Джерело, URAN, Open Academic Journal Index (OAJI), Polska Bibliografia Naukowa, Research Bible, International Institute of Organized Research (I2OR), Academic Keys, General Impact Factor, Directory of Research Journals Indexing (DRJI), Scientific Indexing Services, Cosmos Impact Factor, Infobase Index, Real Time Impact Factor, електронного архіву наукових матеріалів ELAKPI. Підписано до друку за рекомендацією Вченої ради Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (протокол № 9 від 7 жовтня 2019 р.).

Коректор В.Г. Смоляр. Комп'ютерна верстка О.С. Іщенко.

Відповідальний за випуск видання Н.О.Кравчук.

ISSN 1813-5420 (Print), 2308-7382 (Online).

Адреса редакції 03056, Україна, м.Київ, вул.Борщагівська, 115, к.315,
тел. (38-044) 406-85-14, e-mail: kravkpi@ukr.net

Видавець КПІ ім. Ігоря Сікорського Видавництво «Політехніка»,
м.Київ, вул. Політехнічна, 14, корп. 15.

Увага! Передрукування матеріалів іншими виданнями можливе лише з дозволу редакційної колегії журналу **ЕНЕРГЕТИКА: економіка, технології, екологія**

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019

NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF UKRAINE
“IGOR SIKORSKY KYIV POLYTECHNIC INSTITUTE”

POWER ENGINEERING

economics, technique, ecology

ENERHETYKA:
ekonomika, tekhnolohiyi, ekolohiya

The Scientific Journal

№ 2 (56) – 2019

Published 4 issues per year

Founded in March 2000

Sustainable energy
Smart Grid system of ta technologies
Liberalized energy market
Energy technologies and equipment
Energy management and audit
Energy systems and complexes
Environmental problems in energy

Kyiv

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

2019

Editor-in-chief Yu.I. Yakymenko

Deputy editors-in-chief S.P. Denysiuk, O.S. Yandulskyi, E.M. Pysmennyi

Deputy O.O. Zakladnyi

EDITORIAL BOARD: (Ukraine) A.O. Avramenko, B.I. Basok, O.F. Butkevych, O.O. Vovk, A.V. Voloshko, G. Voropaiev, V.I. Deshko, V.Ya. Zhuykov, S.O. Kudrya, A.V. Nosovsky, M.Ya. Ostroverkhov, S.M. Peresada, V.A. Popov, K.K. Tkachuk, V.O. Tuz, O. Yu. Chernousenko, S.P. Shevchuk, V.F. Shinkarenko

FOREIGN MEMBERS OF EDITORIAL BOARD: E. Handschin (*Institute of Power Systems and Power Economics of Dortmund Technical University, Germany*), Richard Strzelecki (*Electro technical Institute, Warsaw, Poland*), P.Y. Ekel (*Pontifical Catholic University of Minas Gerais, Belo Horizonte, Brazil*), A.V. Kuznetsov (*North Caroline State University, USA*), V. Oleschuk (*Institute of Power Engineering of the Academy of Sciences of Moldova*), O. Kuznetsov (*University of Applied sciences, Germany*), Carlos F. Pfeiffer (*University College of Southeast Norway*), A. Baskys (*Vilnius Gediminas Technical University, Vilnius, Lithuania*), Opitz H. Joachim (*EIH Energy Institute Hamm, Germany*), V. Postolati (*Institute of Power Engineering of the Academy of Sciences of Moldova*), Roshan Sharma (*University of South-Eastern Norway*).

Technical secretary N.O. Kravchuk

Website of the journal <http://energy.kpi.ua>

Journal was registered Certificate of State Registration Printed Media series KB №22857-12775PIP dated 14 June 2017

The Journal was registered by decision Attestation commission MES of Ukraine of December 13, 2016, approved by order of MES of Ukraine № 1604 of December 22, 2016 as an occupational edition. The Journal is included in databases «Scientific Periodicals of Ukraine», Google Scholar, Index Copernicus WorldCat, BASE, OpenAIRE, RSCI, Djerelo, URAN, Open Academic Journal Index (OAJI), Polska Bibliografia Naukowa, Research Bible, International Institute of Organized Research (I2OR), Academic Keys, General Impact Factor, Directory of Research Journals Indexing (DRJI), Scientific Indexing Services, Cosmos Impact Factor, Infobase Index, Real Time Impact Factor, electronic archive of research materials ELAKPI. Passed for printing under recommendation of Academic Council of National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (protocol № 9 on October 7, 2019).

Proofreading V.G. Smoliar. Desktop publishing O. Ishchenko.
Responsible for the publication N.O. Kravchuk.

ISSN 1813-5420 (Print), 2308-7382 (Online).

Address of editorial office 03056, Ukraine, Kyiv, 115 Borschagivska str., office 315
tel. (38-044) 406-85-14, e-mail: kravkpi@ukr.net

The publisher Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute Publ.hous "Politehnika", Kyiv, 14 Polytechnique str., b. 15.

Attention! Reprint material in other publications only with the permission of editorial board of the journal **POWER ENGINEERING: Economics, Technique, Ecology**
© Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2019

ЗМІСТ

SMART GRID СИСТЕМИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ

С.П. Денисюк, І.В. Коротенко, І.В. Лило. Формування мережевої інфраструктури інтелектуальних електроенергетичних спільнот в Україні	7
--	---

ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

Б.І. Басок, А.В. Тимошенко. Високотемпературний компактний керамічний регенеративний теплообмінний апарат	17
--	----

В.В. Каплун, В.М. Штепа, С.С. Макаревич. Нейромережева модель прогнозування генерації електроенергії відновлювальними джерелами у системі енергоменеджменту локальних об'єктів	27
---	----

А.М. Терех, А.В. Баранюк, В.А. Кондратюк, В.А. Рогачев, А.И. Руденко. Теплообмін поперечно-омиваних пакетів плоскоовальних труб	39
--	----

М.К. Безродний, О.О. Майстренко. Ефективність теплонасосно-адсорбційної системи консервування енергетичного обладнання	49
---	----

МОНІТОРИНГ, ДІАГНОСТИКА ТА КЕРУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ ТА ОБЛАДНАННЯМ

М. Abdulhamid, O. Billy. Study of Distributed Slack Bus Model for Economic Dispatch of Renewable	59
---	----

В.В. Михайленко, В.В. Святненко, Ю.М. Чуняк, О.С. Чарняк. Дослідження електромагнітних процесів у перетворювачі з одинадцятизонним регулюванням напруги	69
--	----

О.О. Закладний. Алгоритми захисту електродвигунів засобами сучасних систем діагностування їх стану	75
---	----

В.М. Кутін, Є.А. Бондаренко, М.В. Кутіна. Метод ризик-аналізу для прогнозування технічного стану електрообладнання трансформаторних підстанцій	84
---	----

О.А. Жученко. Керування циклічними процесами в умовах дискретного просторово-часового завдання	90
---	----

В.В. Чумак, М.А. Коваленко, І.В. Ткачук. Математичне моделювання лінійного двигуна для сепаратора лому кольорових металів	99
--	----

О.В. Сподинський, А.В. Зайченко. Впровадження протиаварійної автоматики мережі 110-150 кВ південної ЕС, як засобу для підвищення надійності електропостачання споживачів	109
---	-----

До 100 – річчя Винославського Василя Миколайовича	113
--	------------

Вимоги до оформлення статей	115
--	------------

CONTENTS

SMART GRID SYSTEM AND TECHNOLOGY

S.Denysiuk, I.Korotenko, I.Lylo. Formation of network infrastructure of intellectual electricity communities in Ukraine 7

ENERGY EFFICIENCY AND ENERGY SAVINGS

B. Basok, A. Timoshchenko. High temperature compact ceramic regenerative heat exchanger 17

V. Kaplun, V. Shtepa, S. Makarevych. Neuro-network model for providing electricity generation by renewable sources in energy management system of local object 27

A. Terekh, A. Baranyuk, V. Kondratiuk, V. Rogachov, A. Rudenko. Heat transfer of flat-oval tube bundles in cross flow 39

M. Bezrodny, O. Maistrenko. Efficiency of heat pump and adsorption system of conservation of energy equipment 49

MONITORING, DIAGNOSTICS AND MANAGEMENT OF ENERGY PROCESSES AND EQUIPMENT

M. Abdulhamid, O. Billy. Study of Distributed Slack Bus Model for Economic Dispatch of Renewable 59

V. Mihaylenko, V. Sviatnenko, J. Chuniak, O. Charniak. Study of the electromagnetic processes in converter with eleven zone regulation voltage 69

O. Zakladnyi. Algorithms of protection of electric motors by means of modern systems of diagnostic of their states 75

V. Kutin, Y. Bondarenko, M. Kutina. Risk analysis method for forecasting the technical condition of electrical equipment of transformer substations 84

O. Zhuchenko. Cyclic processes control in discrete space-time tasks 90

V. Chumack, M. Kovalenko, I. Tkachuk. Mathematical simulation of a linear induction motor for color metals separation 99

O. Spodynskiy, A. Zaychenko. Implementation of the 110-150 kv south ES as a means to increase the reliability of consumer electricity 109

To the 100th Anniversary of Vasily Vinoslavsky 113

Requirements for the articles 115

SMART GRID СИСТЕМИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ SMART GRID SYSTEM AND TECHNOLOGY

УДК 621.31

С.П. Денисюк, д-р техн. наук, професор., ORCID 0000-0002-6299-3680

І.В. Коротенко, магістрант, ORCID 0000-0002-3546-5874

І.В. Лило, магістрант, ORCID 0000-0002-9296-6720

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

ФОРМУВАННЯ МЕРЕЖЕВОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СПІЛЬНОТ В УКРАЇНІ

Ключові показники ефективності є важливими інструментами як при визначенні цілей стратегічного розвитку, так і при плануванні мережевої інфраструктури Інтелектуальних Електроенергетичних Спільнот (ІЕС). Основною метою впровадження Smart Grid є суттєве покращення рівня життя людей, які використовують дані системи. Розвиток інтелектуальних технологій в електроенергетичному секторі спрямований на зменшення використання паливних ресурсів та підвищення енергоефективності електричного обладнання, що використовується при генерації, розподілі та передачі електричної енергії. Розвиток інтелектуальних систем базується на використанні відновлюваних джерел енергії, адже вони виступають альтернативним джерелом живлення для споживача. Аналіз роботи існуючих систем з подальшим чітким розумінням всіх недоліків та моделювання нових систем на основі отриманих даних виступає ключовим методом впровадження інтелектуальних систем в енергетичному секторі. У статті розглядається сучасний стан енергетичної системи та можливість впровадження сучасної структурної моделі побудови електроенергетичної мережі з використанням відновлюваних джерел енергії. Розглядається необхідність створення оператора ESC для поліпшення взаємодії активних споживачів з енергосистемою. Проводиться аналіз взаємодії різних суб'єктів енергосистеми які створюють енергетичні об'єднання на базі Smart Grid. Актуальність розгляду даного питання є стратегія України по збільшенню частки відновлюваних джерел енергії та необхідність модернізації, автоматизації об'єднаної енергетичної системи України (ОЕС України).

Ключові слова: Інтелектуальні Електроенергетичні Спільноти, інтелектуальна електромережа, інтелектуальні електроенергетичні технології, Energy Smart Community, оператор ІЕС, відновлювані джерела енергії, активний споживач, агрегатор.

Глобальний розвиток Smart Grid технологій в енергетичних секторах країн світу підтверджує свою ефективність та необхідність в контексті модернізації існуючих енергетичних об'єднань та введення нових інтелектуальних систем на різних енергетичних рівнях [1]. Енергетичний сектор України потребує використання систем, ключовими показниками яких є швидке інтегрування та максимальна ефективність відносно встановленої вартості. Технічна та моральна зношеність електричного обладнання на підстанціях, втрати при передачі електричної енергії та багато інших чинників призводять до значних фінансових втрат [2]. Будівництво нових мереж, підстанцій, модернізація та автоматизація приватних підприємств відбувається за рахунок економічної зацікавленості приватних осіб. Відсутність стимулювання для впровадження нових Smart технологій суттєво уповільнює технічний розвиток Об'єднаної енергетичної системи (ОЕС) України.

В Україні завдяки державному стимулюванню розвитку відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) суттєво збільшились обсяги «зеленої» генерації. Впровадження «зелених» тарифів, що будуть діяти до 2030 року [3]. За увесь 2018 рік встановлена потужність об'єктів відновлюваної енергетики, що працюють за «зеленим» тарифом з урахуванням сонячних електростанцій (СЕС) приватних домогосподарств склала 848 МВт (загальна встановлено потужність 2247 МВт). Загальний обсяг введених в експлуатацію об'єктів відновлюваних джерел енергії станом на 1 півріччя 2019 року склало 3634 МВт від загального обсягу встановлених потужностей ОЕС України. Об'єкти на базі фотоелектричних установок складають 2640 МВт (73%) від загального обсягу ВДЕ, встановлених на території України. Серед них 276 МВт припадає на 1188 приватних домогосподарств [4]. За 1 півріччя 2019 року встановлена потужність ВДЕ зросла біль-

ше, ніж за увесь 2018 рік на 14 МВт. Галузь є вкрай привабливою для надходження нових та покращення вже існуючих інвестиційних програм зі сторони країн-партнерів, що дозволило за декілька років у рази збільшити кількість генерації та сприяло розвитку ВДЕ в енергетичному секторі України.

Метою дослідження є узагальнення сучасного стану мережевої інфраструктури у сфері інтелектуального керування електроенергетичними ресурсами, визначається рівень використання інформаційних та технологічних ресурсів для координації та оптимізації процесів керування енергосистемою, беручи до уваги; технічні обмеження, геокліматичні умови регіону, встановлення силового та інформаційного зв'язку між споживачем та енергосистемою та задачі з розвитку ОЕС України.

1. Актуальність впровадження Smart систем для формування інтелектуальних електроенергетичних спільнот в Україні

У контексті розвитку Інтелектуальної Електроенергетичної Спільноти (ІЕС) - потреба в інтелектуальних підходах до керування та координації технологій різного спектру для перетворення та передачі електричної енергії добре відома [5]. Сьогодні в Україні проблему впровадження систем Smart Grid на рівні ОЕС України вже вирішується залученням системи Smart Metering [6] (інтелектуальний облік використаної та згенерованої в мережу електричної енергії) та широким розповсюдженням різного роду інтелектуальних датчиків та систем моніторингу з вбудованими алгоритмами керування. Однак необхідно створити актуальні методи для роботи зі складними мережами, визначивши певні проектні та експлуатаційні рішення для систем, які матимуть широкий спектр функцій та велику кількість часових масштабів [7].

Впровадження Smart Grid призводить до суттєвого покращення рівня життя людей, які використовують дані системи, але якісне і нове обладнання коштує значних фінансових вкладів, що суттєво перешкоджає інсталяції подібних систем в енергетичному секторі України.

З точки зору розвитку всієї енергосистеми, виділяють декілька ключових цілей. Окремі цілі мають різні масштаби розвитку енергосистеми, але в цілому вони направлені на покращення якісних та кількісних характеристик електроенергії для побутового споживача. Деякі з ключових цілей:

- мінімізувати фінансові операційні витрати для всіх учасників (мешканців будинків, уряду, користувачів електромобілів, власників активів, тощо);
- мінімізувати загальний вплив системи на навколишнє середовище;
- максимізувати проникнення поновлюваних джерел енергії;
- підвищення рівня комфорту кінцевого споживача.

Ці цілі можуть бути взаємовиключними, але всі вони вимагають координаційного підходу до їх вирішення. Впровадження системи управління полягає в тому, щоб оптимально координувати різні енергетичні активи в регіоні, керуючи окремими компонентами, щоб задовольнити більш широкі системні обмеження, а також звести до мінімуму екологічні та економічні наслідки. Складна особливість енергетичного сектора на рівні керування в його масштабі, з великою кількістю зацікавлених сторін, які мають різні цілі та стратегії розвитку. Розгляд кожного сектору незалежно від інших може привести до порушення системних обмежень вищого рівня [8]. Крім того, навіть якщо всі компоненти і системні обмеження обробляються в рамках єдиної централізованої структури керування енергосистемою, різні цілі можуть привести до суперечливих запитів. Наприклад, скорочення власного споживання у генератора, може привести до погіршення роботи системи.

Проектування та функціонування Smart систем в Україні є необхідним, адже збільшенням кількості об'єктів Розосередженої генерації (Рг) в цілому негативно впливає на енергетичний сектор. Впровадження Smart мереж дозволить локалізувати певні ділянки та рівні системи для можливості місцевого регулювання шляхом введення оператора, який буде взаємодіяти між зацікавленими споживачами та ОЕС України. Перехід до місцевого регулювання та локалізації системи дозволить скоротити кількість проміжних ланок (розподілу та постачання), що зумовить підвищення надійності та стійкості системи в цілому. Локалізація окремих ланок енергетичного сектору спонукає до появи різного виду «активних» споживачів та операторів інтелектуальних електроенергетичних систем.

2. Формування структурної моделі інтелектуального електроенергетичного середовища в Україні

Концепція ІЕС припускає активну роль споживача електричної енергії [9], коли він стає, з одного боку, активним суб'єктом розробки й прийняття рішень по розвитку й функціонуванню енергосистеми (як власної, так і колективної), а з іншого боку об'єктом керування, що забезпечує реалізацію ключових вимог. Зацікавлені споживачі діляться на три основні рівні: споживач (consumer) [10], «активний» споживач (prosumer) та професійний споживач з можливістю накопичування електроенергії (prosumage) [11]. Розподіл «активних» споживачів (АС) дозволяє побудувати модель інтелектуального енергетичного середовища (рис.1), з урахуванням можливостей взаємодії АС з ОЕС України та оператором, ключовими функціями якого є оперативне керування локальними електроенергетичними системами [12], координація дій інтелектуальних спільнот та інформаційна, правова підтримка активних споживачів підпорядкованого регіону.

Споживач (consumer) електричної енергії виступає зацікавленим суб'єктом ринку електричної енергії, ключовим стимулюванням його діяльності на ринку електричної енергії є зацікавленість у енергоефективному використанні електричної енергії [13]. Після переходу до нового ринку електричної енергії споживач буде зацікавлений у отриманні інформації від постачальника про зміни на ринку електричної енергії, адже зміни на ринку електричної енергії в подальшому будуть відображатись у ціні на електричну енергію та її якісних показниках. Створення конкурентної моделі на ринку електричної енергії надасть можливість для споживача самому обирати постачальника, що в свою чергу призведе до отримання певної вигоди: зменшення споживання, зменшення вартості на електричну енергію, можливість впливати на вартість електричної енергії, покращення якісних характеристик електричної енергії, підвищення надійності та безпеки постачання.

Зі свого боку, prosumer у певні інтервали часу виступає як звичайний покупець електроенергії, але можливість генерувати електричну енергію надає йому можливість впливати на стан енергосистеми та ціни на ринку електричної енергії [14]. Розвиток АС обумовлений можливостями зменшення втрат електричної енергії та збільшення колективного прибутку. Об'єднання АС дозволяє локалізувати певні об'єкти енергетичної системи, що в свою чергу надасть більше можливостей по управлінню енергосистемою в цілому. Фінансова зацікавленість АС дозволить створити певні об'єднання на базі нових технологій в енергетичному секторі, що обумовить розвиток електроенергетичної системи за рахунок впровадження інтелектуальних систем.

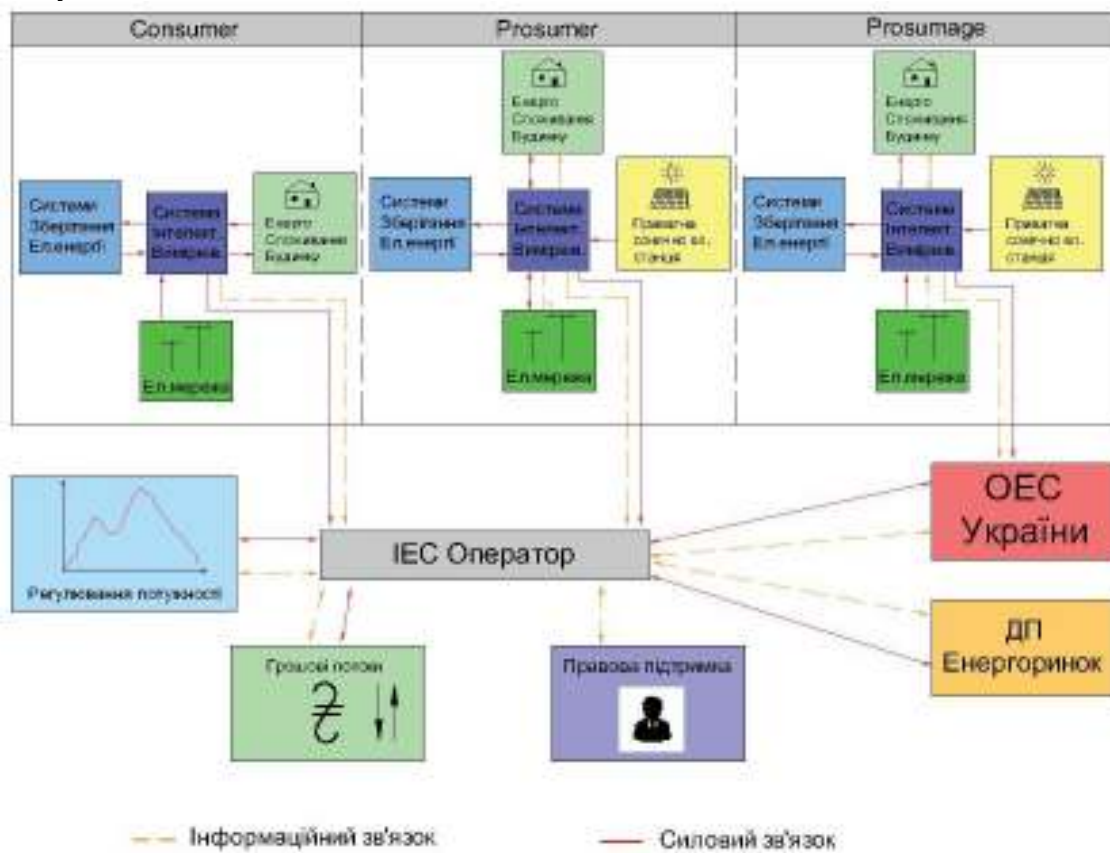


Рис. 1. Структурна модель інтелектуального електроенергетичного середовища

Найбільшими перевагами наділений prosumage, «активний» споживач з можливістю акумулювати електричну енергію. Можливість регулювати власне споживання, генерацію та акумулювання дозволяє АС оперативно реагувати щодо змін на ринку електричної енергії. Слід зазначити, що АС спроможний впливати на ринок електричної енергії через систематичні дії [15]. Отримання найбільшої економічної вигоди спонукає до збільшення кількості АС не тільки в кількісному а й у якісному еквіваленті.

В Україні права, обов'язки та відповідальність споживачів електричної енергії визначаються законами України "Про електроенергетику", "Про захист прав споживачів", кодексом електричних мереж, кодексом комерційного обліку, правилами користування електричною енергією (які включають правила користування електричною енергією для побутових споживачів) та іншими нормативно-правовими актами [16]. Відповідно до цих законів можна оперувати наступними визначеннями при описі різновидів споживачів електричної енергії: споживач, захищений споживач, малий побутовий споживач, побутовий споживач, побутовий споживач та кваліфікований споживач.

Для кваліфікованого споживача діє ряд правил та обмежень відповідно до законодавства України. Кваліфікований споживач має право купувати електричну енергію для власного споживання на ринку двосторонніх договорів за умови, що він набув статусу учасника ринку та став стороною, відповідальною за баланс [16]. Кваліфікований споживач не має права здійснювати перепродаж електричної енергії іншим учасникам ринку. Брати участь у балансуванні мають право кваліфіковані споживачі, що відповідають вимогам правил ринку електричної енергії щодо участі у балансуванні.

На енергоринку України здійснює свою діяльність споживач з керованим навантаженням – це споживач який змінює графік свого споживання відповідно до вимог (потреб) ринку. Споживач з керованим навантаженням функціонує на ринку допоміжних послуг та на балансуєчому ринку. На балансуєчому ринку він знаходиться в групі трейдерського резерву і виводиться з мережі в складі третинного резерву для забезпечення якості електричної енергії та підтримки частотного режиму мережі.

Введення нових споживачів на новоствореному конкурентному ринку електричної енергії України збільшить кількість важелів впливу на енергетичний баланс України. Можливість керувати графіком споживання збільшить балансуєчі резерви та дозволить покращити якість електричної енергії, яку отримує кінцевий споживач та підвищить енергоефективність системи в цілому.

3. Нормативно-технічна база для впровадження «інтелектуальних» енергетичних систем на основі технологій Smart Grid

При встановленні конкурентної моделі на ринку електроенергії постачальник, який використовує інтелектуальні мережі, буде отримувати чітку інформацію з потрібними часовими масштабами щодо споживання окремо взятого споживача [17]. Побудова статистичних графіків споживання в реальному часі дозволить зрозуміти потреби, які необхідно задовольнити, а при конкурентній моделі буде спонукати постачальника до більш чіткого аналізу, для збільшення кількості споживачів.

Обробка даних, які в реальному часі та у великій кількості буде отримувати оператор від АС необхідно обробляти, перетворювати в інформацію та статистичні дані, на основі яких проводити розрахунки для оперативного керування інтелектуальною системою вимагає великої кількості обчислювальної потужності [18]. Забезпечення регуляторної бази відбувається за рахунок створення стандартів, дії яких розділяються в залежності від напрямків обробки даних (рис.2).

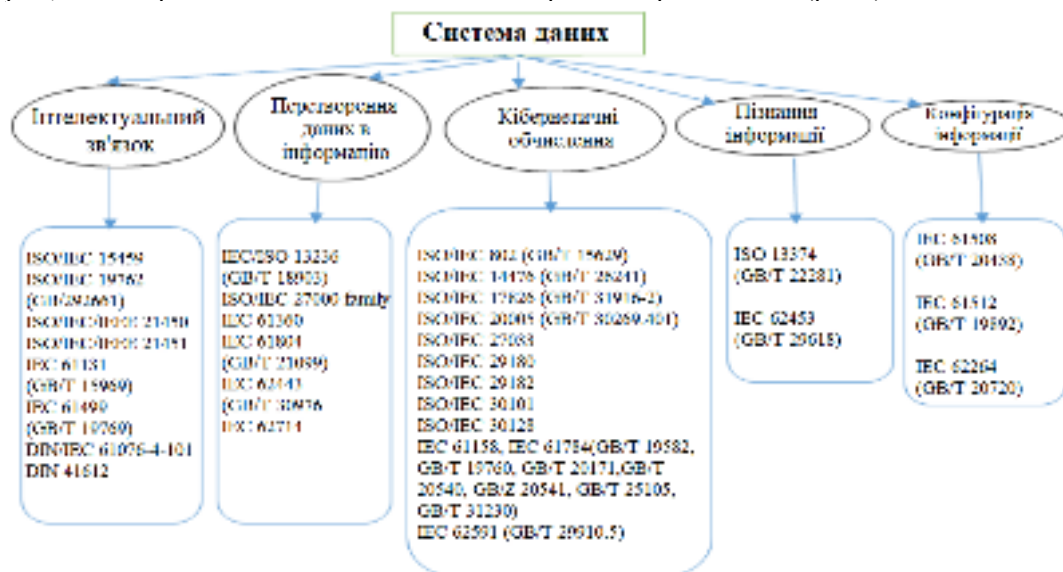


Рис. 2. Стандарти обробки інформації

Європейські компанії спільно з провідними інститутами стандартизують оперативне керування інтелектуальними системами [19]. Інтелектуальними системами розділяються в залежності від масштабів та складності, що дозволяє структурувати інформаційні потоки. Слід виділити комплекс стандартів IEEE 1547, який містить ряд документів, присвячених різним аспектам забезпечення взаємодії та зв'язності між розподіленими ресурсами, інтегрованими до складу енергетичних систем, і складається з таких частин:

- IEEE 1547.1 – стандарт загальної процедури відповідності випробувань приєднання розподілених джерел енергії до енергосистеми;
- IEEE 1547.2 – визначає деталізовані вказівки приєднання на паралельну роботу;
- IEEE 1547.3 – вимоги по обміну інформацією, моніторингу та контролю розподілених джерел енергії;
- IEEE 1547.4 – вимоги до обладнання та його експлуатації у відокремлених локальних енергосистемах з розподіленими джерелами енергії;

- IEEE 1547.5 – призначений для розподілених джерел енергії потужністю вище 10 МВА;
- IEEE 1547.6 – практичні аспекти підключення розподілених джерел енергії до розподільчих мереж;
- IEEE 1547.7 – керівництво по визначенню впливу малої генерації на енергосистему;
- IEEE 1547.8 – методичні рекомендації щодо впровадження IEEE 1547

З точки зору розподільних мереж високий рівень впровадження локальних енергетичних мереж, таких як системи акумуляції, електромобілі та регульовані пристрої змінили традиційну концепцію енергетичної системи та призвели до ускладнення розподільчих мереж. Зміни у енергетичній системі призводять до збільшення вимог що до надійності ОЕС України.

4. Функціонування оператора в енергетичній системі України

Для координації та оперативного керування активними споживачами та їх об'єднаннями, на ринку створюються оператори *інтелектуальних електроенергетичних спільнот (Оператор ІЕС)*. Оператори ІЕС виступатимуть посередниками між локальними системами та енергосистемою (рис.3). Фінансове стимулювання оператора ІЕС дозволить ввести конкуренцію на ринку операторів, що в свою чергу, призведе до підвищення якості послуг та підвищить рівень комфорту кінцевого споживача [20]. Стимулювання за рахунок фінансових відрахувань та конкуренції серед операторів буде сприяти покращенню якості надаваних послуг, якості обслуговування та підвищить рівень інформування кінцевого споживача.

Швидкі та надійні канали двостороннього зв'язку можуть бути реалізовані за рахунок стандартизації та правової підтримки. Оператор ІЕС повинен надавати програмну платформу для взаємодії, як з внутрішніми об'єктами енергетичної системи, так і зовнішніми (оптовий ринок електричної енергії).

Основні функції оператора:

- створити базовий функціональний інтерфейс; моніторинг, служба повідомлень та звітів;
- надати та пояснити функції фінансових розрахунків; розрахунок розрахункової ціни, налаштування цінових діапазонів, прогнозування ціни-пропозиції на оптовому ринку електричної енергії;
- функції керування та диспетчеризації; алгоритм диспетчеризації направлений на відповідність графіку.

Для структуризації електроенергетичної мережі Оператор ІЕС/агрегатор може розглядатися, як глобальний контролер та посередник між кінцевим споживачем та енергосистемою:

$$wE_{\text{оператор}}(h) = \sum_{i=1}^N E_i(h), \quad (1)$$

$$wE_{\text{оператор}}(h) = \alpha \sum_{i=1}^N (wP_i(h) \times E_i(h)) / \sum_{i=1}^N E_i(h), \quad (2)$$

-де кількісний блок $wE_{\text{агрегатор}}(h)$ представлений у вигляді суми кількісних пакетів Microgrids (MGs); αi – вартість витрат для MG;

$E_i(h)$ – кількість електричної енергії від MGs за одиницю часу;

$wP_i(h)$ – ціна на електричну енергію від MGs за одиницю часу.

Системи MG є основними гравцями на ринках роздрібною торгівлі електричної енергії. Вони, як правило повинні бути з'єднані з шиною базової розподільної мережі. Учасники ринку можуть бути різних типів і масштабів, наприклад комерційні MG, або житлові MG. Ми розглядаємо загальну вартісну функцію MG як:

$$C_i(E_i) = [a_i(E_i)^{1+b_i} / (1 + b_i)] + c_i \quad (3)$$

-де a_i – швидкість збільшення собівартості;

b_i – зміна витрат (функція витрат виконується в квадратичній формі, $b_i = 1$);

c_i – фіксована вартість.

Системи акумуляції енергії, обладнані інтелектуальними технологіями, може поглинати майже будь який надлишок від генераторів. Стан заряду системи акумуляції енергії потребує уваги під час процесу зарядки / розрядки, що забезпечується системами моніторингу. Функція моніторингу стану заряду в часовому інтервалі h може бути описана як:

$$E_i^{ESS}(h) = E_i^{ESS}(h-1) + \eta_i P_i^{ESS}(h) \Delta h \quad (4)$$

$$E_i^{ESS}(h) = E_i^{ESS}(h-1) + P_i^{ESS}(h) / \eta_d \Delta h \quad (5)$$

-де рівняння (5) описує режим зарядки системи акумуляції електричної енергії у часовому проміжку h , коли потужність заряду $P_i^{ESS}(h)$ додатна;

-рівняння (6) описує систему акумуляції електричної енергії у часовому проміжку h , коли потужність $P_i^{ESS}(h)$ від'ємна.

Надлишок електричної енергії використовується для повного заряду системи акумуляції. Електрична енергія, що знаходиться у системах акумуляції використовується для задоволення потреб на роздрібному ринку електричної енергії та місцевого попиту, коли генерація електричної енергії нижча за попит. Якщо електричної енергії від систем місцевої генерації чи систем акумуляції недостатньо, РЕС

оператор може купувати електричну енергію у комунальної компанії на балансуєчому ринку електричної енергії.

Збільшення кількості MG_i призводить до появи нових учасників на оптовому ринку електричної енергії та підвищенню асортименту торгової кількості та якості:

$$0 \leq E_i(h) \leq E_i^{generation}(h) - (1 - \omega_i)E_i^{load}(h) \quad (6)$$

Права частина рівняння представляє надлишок електричної енергії від MG_i , для торгівлі на оптовому ринку електричної енергії, w_i – швидкість проникнення керованого навантаження в MG_i . На практиці w_i регулюється так, щоб при запиті на попит відповідати операції кількості на оптовому ринку електричної енергії. Загальний дохід MG_i (R_i^{total}) визначається, як сума доходів, як на оптовому ринку електричної енергії $\omega R_i(h)$, так і на балансуєчому ринку за проміжок часу h ($R_{i,j}(h)$):

$$R_i^{total} = \sum_{h=1}^H R_{i,j}(h) + \sum_{h=1}^H \omega R_i(h) \quad (7)$$

Однак на сьогодні для роботи і керування PEC все ще не вистачає досконалих методів оцінки комфорту користувачів і досліджень по споживанню відновлюваної енергії, що серйозно ускладнить подальший розвиток PEC. Також малої популярності набуло інформування та правова підтримка «активних» споживачів. Дуже важливо додатково вивчити вплив рівня комфорту користувача [21], споживання відновлюваної енергії та інших факторів на оптимальну роботу. Чітке розуміння потреб споживачів дозволить проектувати енергетичні системи, які будуть у повному обсязі задовольняти потреби учасників ринку електричної енергії [22]. Стимулювання учасників ринку за рахунок певних надбавок допоможе створити живу конкуренцію яка стане основою розвитку Інтелектуальних електроенергетичних спільнот в Україні.

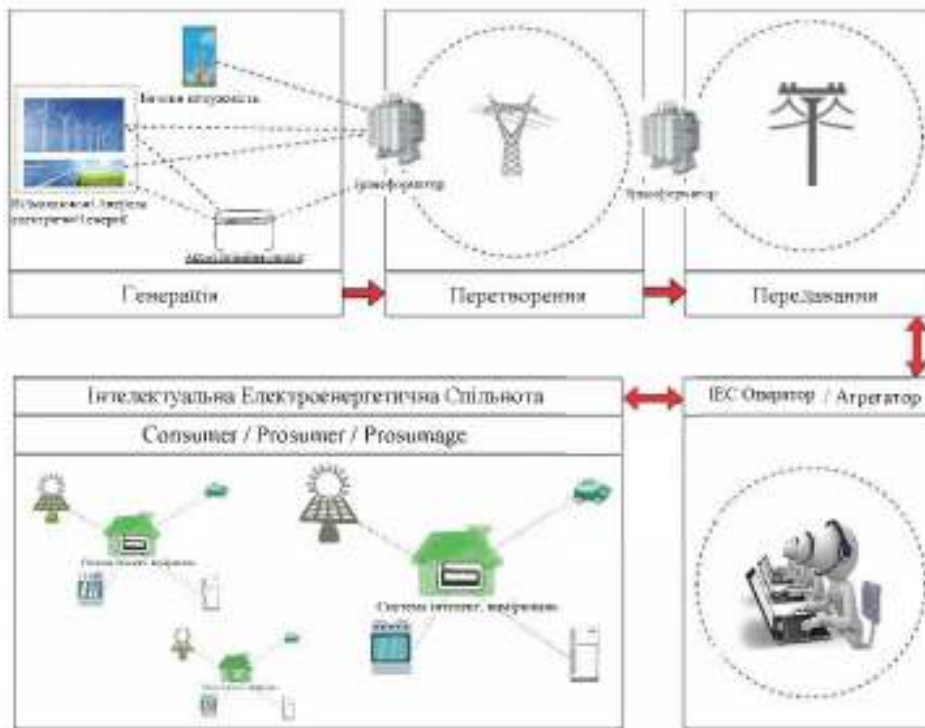


Рис. 3. Становлення оператора PEC / Агрегатора в енергетичній системі України

Інтеграція систем Energy Smart Community (ESC) в Україні на даний момент є дуже важливим, адже воно дає можливості для розвитку Smart City (Розумне місто). У контексті розвитку Smart Grid потреба в інтелектуальних підходах до керування і координації різноманітного спектра технологій постачання та перетворення зі збільшення попиту добре відома [23].

Широкомасштабне поширення інтелектуальних пристроїв моніторингу в поєднанні з впровадженням вбудованих алгоритмів обчислювального інтелекту може допомогти вирішити багато технічних проблем, пов'язаних з впровадженням інтелектуальних електроенергетичних систем [24]. Проте, бар'єри все ще існують, оскільки необхідні відповідні методи для роботи зі складними мережами учасників (часто з конкуруючими цілями) при визначенні проектних і експлуатаційних рішень для систем з широким спектром функцій і часових масштабів.

Висновки

1. Суттєве зношення обладнання Українських електромереж та стрімкий розвиток інтелектуальних систем на базі відновлюваних джерел надають можливості до заміни обладнання на сучасне. Впровадження сучасних технологій розрахованих на двосторонній зв'язок допоможе побудувати сучасну, розвинену мережеву інфраструктуру ключовими цілями якої буде підвищення якісних показників енергосистеми на всіх її рівнях.

2. Впровадження інтелектуальних та Smart технологій для координації та оптимізації процесів генерації, розподілення та передачі, проектування та керування енергосистемою дозволить суттєво підвищити ефективність енергосистеми. Беручи до уваги технічні обмеження та ключові цілі розвитку ОЕС України можливе створення ІЕС на базі розвинутих АС при співпраці з РЕС Оператором.

3. Встановлення конкурентної моделі на ринку електричної енергії стимулюватиме до створення нових та розвитку вже існуючих операторів, ключовими задачами яких буде координація АС, інформування кінцевого споживача та створення доступного онлайн майданчика для об'єднання АС у ІЕС. Україна має можливість зробити інтелектуальний скачок за рахунок своєчасного переходу на Smart технології в електроенергетичній галузі.

Список літератури

1. Edward O'Dwyer, Indranil Pan, Salvador Acha, Nilay Shah «Smart energy systems for sustainable smart cities: Current developments, trends and future directions» Applied Energy Volume 237, 1 March 2019, Pages 581-597.

2. ДП «НЕК «Укренерго» Науково-технічний центр електроенергетики «План розвитку системи передачі Укренерго 2019 – 2028 роки», Київ – 2017, 51с.

3. Закон України «Про альтернативні джерела енергії» Розділ 2, стаття 9.

4. Електронний ресурс: <https://ua-energy.org/uk/posts/v-ukraini-pratsiuiie-maizhe-12-tys-domashnikh-ses>

5. Peter Boait, J. Richard Snape, Robin Morris, Jo Hamilton and Sarah Darby «The Practice and Potential of Renewable Energy Localisation: Results from a UK Field Trial» Sustainability 2019, 11(1), 215.

6. ДП «НЕК «Укренерго» Науково-технічний центр електроенергетики «Аналіз зарубіжної практики впровадження сучасних автоматизованих систем обліку електроенергії», Київ – 06/2014, 78с.

7. Cihan Gercek and Angèle Reinders «Smart Appliances for Efficient Integration of Solar Energy: A Dutch Case Study of a Residential Smart Grid Pilot» Appl. Sci. 2019, 9(3), 581.

8. Thomas Bauwens «Analyzing the determinants of the size of investments by community renewable energy members: Findings and policy implications from Flanders» Energy Policy Volume 129, June 2019, P. 841-852.

9. M.L. Tuballa, M.L. Abundo «A review of the development of Smart Grid technologies» of Renewable and Sustainable Energy Reviews 59 (2016) 710–725.

10. Денисюк С.П. Особливості формування активного споживача в сучасних електромережах С.П. Денисюк, Т.М. Базюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. –2014. – № 3. – С. 75–79. – ISSN 1997-9274.

11. Schill, Wolf-Peter; Zerrahn, Alexander; Kunz, Friedrich; Kemfert, Claudia «Decentralized solar prosumage with battery storage: System orientation required» DIW Economic Bulletin Vol. 7, Iss. 12/13, pp. 141-151, Berlin 2017.

12. Kyrylenko O.V. Suchasni tendencii pobudovu ta keruvannya rezshimamu electroenergetichnih merezsh / O.V. Kyrylenko, S.P. Denysuk // Energy saving. Power engineering. Energy audit. – 2014. – № 9. – Spec. issue P. 2: Power electronics and energy efficiency. – pp. 82 – 94.

13. Sally P. Caird & Stephen H. Hallett «Towards evaluation design for smart city development, Journal» of Urban Design Volume 23 May 2018, Pages 188-209.

14. Sebastian P. Rosado, Shafiuazzaman K Khadem, «Development of Community Grid: Review of Technical Issues and Challenges» Volume: 55 , Issue: 2 , March-April 2019.

15. P. Sokolovskyi, R. Sharma, 2019 "Estimation of PV systems power production efficiency in the dense urban development condition" Енергетика: економіка, технології, екологія. 2018. № 4. - ISSN 2308-7382.

16. Закон України «Про засади функціонування ринку електричної енергії України» Розділ 2, ст. 14.

17. Mousa Marzband, Fatemeh Azarnejadian, Mehdi Savaghebi, Josep M. Guerrero "View All Authors An Optimal Energy Management System for Islanded Microgrids Based on Multiperiod Artificial Bee Colony Combined With Markov Chain" IEEE Systems Journal (Volume: 11 , Issue: 3 , Sept. 2017).

18. Ahmadi, A., Cherifi, C., Cheutet, V., & Ouzrout, Y. (2017). A review of CPS 5 components architecture for manufacturing based on standards. 2017 11th International Conference on Software, Knowledge, Information Management and Applications (SKIMA). 2017.

19. ДП «НЕК «УКРЕНЕРГО» Науково-проектний центр розвитку ОЕС України «Стан і перспективи розвитку технологій «інтелектуальних» електромереж, управління попитом та систем режимного управління в умовах розвитку поновлюваних джерел енергії», Київ 2018, 122с.

20. О.В. Кириленко, С.П. Денисюк, С.Є. Танкевич, Т. М. Базюк «Інформаційне та нормативне забезпечення організації мультиагентного керування електроенергетичної системи із активним споживачем» Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. 2016. № 1. С. 29–34.

21. Weixian Li, Thillainathan Logenthiran, Van-Tung Phan and Wai Lok Woo “Housing development building management system (hdbms) for optimized electricity bills,” Transactions on Environment and Electrical Engineering, vol. 2, no. 2, pp. 64–71, 2017.

22. Haris Doukas, Vangelis Marinakis, John Tsapelas and Sgouris Sgouridis «Intelligent Energy Management Within the Smart Cities: An EU-GCC Cooperation Opportunity» Smart Cities in the Gulf pp 123-147 Volume 30 October 2018.

23. Thomas Bauwens, Patrick Devine-Wrightb «An empirical study of community energy participation and attitudes to renewable energy» Energy Policy Volume 118, July 2018, Pages 612-625.

24. Gagangeet Singh Aujla, Sahil Garg, Shalini Batra, Neeraj Kumar, Ilsun You, Vishal Sharma, DRoS: A Demand Response Optimization Scheme in SDN-enabled Smart Energy Ecosystem, Information Sciences (2018).

S.Denysiuk. Dr. Eng. Sc., Prof., **ORCID** 0000-0002-6299-3680

I.Korotenko, master student, **ORCID** 0000-0002-3546-5874

I.Lylo, master student, **ORCID** 0000-0002-9296-6720

National Technical University of Ukraine

"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

FORMATION OF NETWORK INFRASTRUCTURE OF INTELLECTUAL ELECTRICITY COMMUNITIES IN UKRAINE

Indicators are important tools both in identifying strategic development goals and in planning the Intelligent Electricity Communities (IES) network infrastructure. The main purpose of Smart Grid implementation is to significantly improve the standard of living of people using the system data. The development of smart technologies in the electricity sector is aimed at reducing the use of fuel resources and improving the energy efficiency of electrical equipment used in the generation, distribution and transmission of electricity. The development of intelligent systems is based on the use of renewable energy sources, as they are an alternative power source for the consumer. Analyzing the performance of existing systems, with a clear understanding of all the shortcomings and modeling of new systems based on the data obtained, is a key method for implementing smart systems in the energy sector. The article deals with the current state of the energy system and the possibility of introducing a modern structural model of building an electricity grid using renewable energy sources. The need to create an ESC operator to improve the interaction of active consumers with the grid is considered. The analysis of the interaction of different entities of the grid creates energy associations based on Smart Grid. The urgency of considering this issue is the strategy of Ukraine to increase the share of renewable energy sources and the need for modernization, automation of the unified energy system of Ukraine (UES of Ukraine).

Keywords: *Intelligent Electricity Communities, intelligent electricity network, intelligent electricity technologies, energy smart community, IES operator, renewable energy sources, consumer, aggregator.*

УДК 621.31

С.П. Денисюк, д-р техн. наук, професор, **ORCID** 0000-0002-6299-3680

И.В. Коротенко, магистрант, **ORCID** 0000-0002-3546-5874

И.В. Лило, магистрант, **ORCID** 0000-0002-9296-6720

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

ФОРМИРОВАНИЕ СЕТЕВОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СООБЩЕСТВ В УКРАИНЕ

Ключевые показатели эффективности являются важными инструментами как при определении целей стратегического развития, так и при планировании сетевой инфраструктуры интеллектуальных электроэнергетических сообществ (ИЭС). Основной целью внедрения Smart Grid является существенное улучшение уровня жизни людей, которые используют данные системы. Развитие интеллектуальных технологий в электроэнергетическом секторе направлен на уменьшение использования топливных ресурсов и повышения энергоэффективности электрического оборудования, используемого при генерации,

распределении и передаче электрической энергии. Развитие интеллектуальных систем базируется на использовании возобновляемых источников энергии, ведь они выступают альтернативным источником питания для потребителя. Анализ работы существующих систем с последующим четким пониманием всех недостатков и моделирования новых систем на основе полученных данных выступает ключевым методом внедрения интеллектуальных систем в энергетическом секторе. В статье рассматривается современное состояние энергетической системы и возможность внедрения современной структурной модели построения электроэнергетической сети с использованием возобновляемых источников энергии. Рассматривается необходимость создания оператора ESC для улучшения взаимодействия активных потребителей с энергосистемой. Проводится анализ взаимодействия различных субъектов энергосистемы, которые создают энергетические объединения на базе Smart Grid. Актуальность рассмотрения данного вопроса является стратегия Украины по увеличению доли возобновляемых источников энергии и необходимость модернизации, автоматизации объединенной энергетической системы Украины (ОЭС Украины).

Ключевые слова: Интеллектуальные Электроэнергетические Сообщества, интеллектуальная электросеть, интеллектуальные электроэнергетические технологии, Energy Smart Community, оператор ИЭС, возобновляемые источники энергии, активный потребитель, агрегатор.

List of references

1. Edward O'Dwyer, Indranil Pan, Salvador Acha, Nilay Shah "Smart Energy Systems for Sustainable Smart Cities: Current Developments, Trends and Future Directions" Applied Energy Volume 237, March 1, 2019, Pages 581-597.
2. SE "NEC" Ukrenergo "Scientific and Technical Center of Power Engineering" Development Plan of Transmission System Ukrenergo 2019 - 2028 ", Kyiv - 2017, 51 p.
3. Law of Ukraine "On Alternative Energy Sources" Section 2, Article 9.
4. Electronic resource: <https://ua-energy.org/en/posts/v-ukraini-pratsiuie-maizhe-12-tys-domashnikh-ses>
5. Peter Boait, J. Richard Snape, Robin Morris, Jo Hamilton and Sarah Darby "The Practice and Potential of Renewable Energy Localization: Results from a UK Field Trial" Sustainability 2019, 11 (1), 215.
6. State Electric Company "Ukrenergo" Scientific and Technical Center of Power Engineering "Analysis of Foreign Practice of Implementation of Modern Automated Electricity Metering Systems", Kyiv - 06/2014, 78 p.
7. Cihan Gercek and Angèle Reinders "Smart Appliances for Efficient Solar Energy Integration: A Dutch Case Study of a Residential Smart Grid Pilot" Appl. Sci. 2019, 9 (3), 581.
8. Thomas Bauwens, "Analyzing the Determinants of Investment Size by Community Renewable Energy Members: Findings and Policy Implications," Energy Policy Volume 129, June 2019, P. 841-852.
9. M.J. Tuballa, M.L. Abundo "A Review of the Development of Smart Grid Technologies" by Renewable and Sustainable Energy Reviews 59 (2016) 710-725.
10. Denisyuk S.P. Features of Active Consumer Formation in Modern Power Networks Denisyuk, T.M. Bazyuk // Bulletin of the Vinnitsa Polytechnic Institute. –2014. - № 3. - P. 75-79. - ISSN 1997-9274.
11. Schill, Wolf-Peter; Zerrahn, Alexander; Kunz, Friedrich; Kemfert, Claudia «Decentralized solar prosumage with battery storage: System orientation required» DIW Economic Bulletin Vol. 7, Iss. 12/13, p. 141-151, Berlin 2017.
12. Kyrylenko O.V. Such tendencies drive this keruvannya rezshimamu electroenergetichnih merezh / O.V. Kyrylenko, S.P. Denysuk // Energy saving. Power engineering. Energy audit. - 2014. - № 9. - Spec. issue P. 2: Power electronics and energy efficiency. - pp. 82 - 94.
13. Sally P. Caird & Stephen H. Hallett «Towards Evaluation Design for Smart City Development, Journal» of Urban Design Volume 23 May 2018, Pages 188-209.
14. Sebastian P. Rosado, Shafiuazzaman K Khadem, "Community Grid Development: A Review of Technical Issues and Challenges" Volume: 55, Issue: 2, March-April 2019.
15. P. Sokolovskyi, R. Sharma, 2019 "Estimation of PV systems power production efficiency in the dense urban development condition" Energy: Economics, Technologies, Ecology. 2018. No. 4. - ISSN 2308-7382.
16. Law of Ukraine "On Fundamentals of Functioning of the Electricity Market of Ukraine" Section 2, Art. 14.
17. Mousa Marzband, Fatemeh Azarinejadian, Mehdi Savaghebi, Josep M. Guerrero "IEEE Systems Journal (Volume: 11, Issue: 3, Sept 2017).
18. Ahmadi, A., Cherifi, C., Cheutet, V., & Ouzrout, Y. (2017). A review of CPS 5 components architecture for manufacturing based on standards. 2017 11th International Conference on Software, Knowledge, Information Management and Applications (SKIMA). 2017.
19. SE "UkrENERGO" Scientific and Research Center for Development of UES of Ukraine "Status and Prospects for the Development of Technologies of "Intelligent" Electricity Networks, Demand Management and Regime Management Systems in the Conditions of Renewable Energy Development", Kyiv 2018, 122 p.
20. OV Kirilenko, S.P. Denisyuk, SE Tankkevich, TM Bazyuk "Information and regulatory support for the organization of multiagent control of the power system with an active consumer" Information Technologies and Computer Engineering. 2016. № 1. P. 29-34.

21. Weixian Li, Thillainathan Logenthiran, Van-Tung Phan, and Wai Lok Woo, “Housing Development Management System (hdbms) for Optimized Electricity Bills,” Transactions in Environment and Electrical Engineering, vol. 2, no. 2, pp. 64–71, 2017.

22. Haris Doukas, Vangelis Marinakis, John Tsapelas and Sgouris Sgouridis "Intelligent Energy Management Within the Smart Cities: An EU-GCC Cooperation Opportunity" Smart Cities in the Gulf pp 123-147 Volume 30 October 2018.

23. Thomas Bauwens, Patrick Devine-Wrightb “An Empirical Study of Community Energy Participation and Attitudes to Renewable Energy” Energy Policy Volume 118, July 2018, Pages 612-625.

24. Gagangeet Singh Aujla, Sahil Garg, Shalini Batra, Neeraj Kumar, Ilsun You, Vishal Sharma, DROpS: A Demand Response Optimization Scheme and SDN-enabled Smart Energy Ecosystem, Information Sciences (2018)

Надійшла 21.04.2019

Received 21.04.2019

ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ENERGY EFFICIENCY AND ENERGY SAVINGS

УДК 666.193; 66.047.37

Б.І. Басок, чл.-кор. НАН України, проф., д.т.н., ORCID 0000-0002-8935-4248
А.В. Тимошенко, к.т.н., ORCID 0000-0001-6840-5491
Інститут технічної теплофізики НАН України

ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИЙ КОМПАКТНИЙ КЕРАМІЧНИЙ РЕГЕНЕРАТИВНИЙ ТЕПЛОБМІННИЙ АПАРАТ

Предметом дослідження виступає високотемпературний компактний керамічний ТА з комірчастою структурою. Стосовно до високотемпературних процесів плавки базальту і варіння скла розглядається можливість його застосування в системі високотемпературного спалювання окислювача. Відзначається, що підігрів окислювача переслідує, як енергетичну, так і технологічну цілі. Наводяться методики визначення нестационарного температурного поля в стінці насадка регенератора і часу роботи ТА з умови забезпечення допустимої температури поверхні насадка. Встановлено, що для діапазону числа Фур'є $Fo \leq 2,5$ можна не враховувати розподіл температури в стінці насадка регенератора і оперувати його середньою температурою. Наводяться характеристики компактних керамічних ТА регенеративного типу, з урахуванням умов проведення теплотехнологічного процесу. Підтверджується їх висока ефективність. Визначається час роботи ТА і його вплив на температуру поверхні насадка. Показано, що з урахуванням умов проведення процесів плавки базальту і варіння скла, матеріал насадка ТА – муліт – не є оптимальним рішенням. Отримана температура насадка регенератора перевищує допустиму величину тривалого застосування. Апробація результатів дослідження проводилася на дослідно-промислових зразках ванних плавильних печей, обладнаних системою НІТАС.

Ключові слова: теплообмінний апарат, регенератор, енергоефективність, базальтові волокна.

Вступ

Варка базальтового скла – процес який крім контролю і підтримання температури й часу обробки скла ще визначається газовою атмосферою, в якій відбувається плавка сировини і варіння скла [1]. Продукти згоряння, що відповідають традиційному процесу спалювання природного газу, характеризуються відновлюваною атмосферою (для підтримки високих температур процесу коефіцієнт надлишку повітря підтримується в діапазоні $\alpha = 1,04-1,15$). Присутність у складі базальтів оксидів заліза (до 15%) вимагають такої організації процесу, за якої іони Fe^{2+} переходили б в іони Fe^{3+} , що вимагає присутності окисного середовища у момент плавки і варіння базальтового скла. Підвищення температури окислювача дозволяє не тільки досягти (підвищити) енергетичну ефективність теплотехнологічної установки, але і забезпечити присутність вільного кисню в зоні варіння скла. Нижче наводиться графічна залежність дійсної температури горіння, як функції від коефіцієнта надлишку повітря α , для різних значень температури окислювача t_{ao} і різної величини втрат в топковому просторі установки q_d (рисунки 1). При обчисленні дійсної температури горіння використовувалися матеріали робіт [2, 3]. Як можна бачити, підігрів окислювача до температури 1300-1400 °С, дозволяє підтримувати задану температуру процесу варіння скла (1500-1550 °С) при підвищених коефіцієнтах надлишку повітря.

Сформульований принцип – підвищення температури окислювача із збільшенням коефіцієнта надлишку повітря у внутрішньому топковому просторі печі, а також результати аналітичних, числових та експериментальних досліджень процесів течії та теплообміну в елементах теплотехнологічного устаткування, реалізовані в дослідно-промислових зразках модульних ванних газоопалювальних базальтоплавильних печей які пройшли тривалу підконтрольну експлуатацію на базі Чернівецького заводу теплоізоляційних матеріалів в складі установок виробництва штапельного і безперервного базальтового волокна.

Традиційно, підігрів окислювача здійснюється продуктами згоряння. Для існуючих технічних рішень системи «теплообмінник – пальниковий пристрій» максимальна температура підігріву окислювача визначається допустимою температурою роботи пальникового пристрою і становить 200-500 °С [1, 4].

© Б.І. Басок, А.В. Тимошенко, 2019

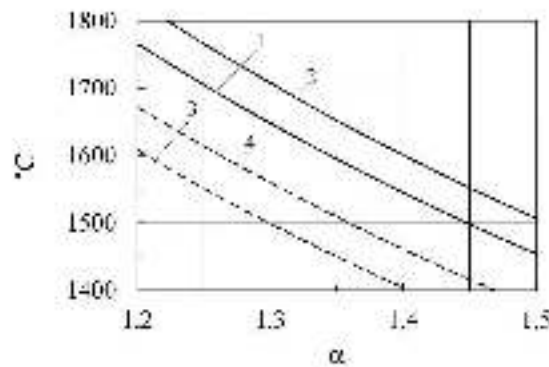


Рисунок 1 – Залежність дійсної температури горіння від коефіцієнта надлишку повітря:
1, 2 - $q_4=50\%$, $t_{ao}=1300, 1400$ °C; 3, 4 - $q_4=60\%$, $t_{ao}=1300, 1400$ °C.

Подальше підвищення температури окислювача вимагає перегляду вимог до теплообмінних і паликових пристроїв. Огляд існуючих рішень високотемпературних теплообмінних апаратів (ТА) представлений в роботі [5]. Предметом цього дослідження виступає компактний високотемпературний та регенеративного типу використовуваний в системі спалювання високотемпературного окислювача, використовуючи аббревіатуру, запропоновану в роботі [6], системі НІТАС (high-temperature air combustion system). Використання високотемпературного ТА в поєднанні з паливними регенеративного типу забезпечує підігрів окислювача до температури на 50 °C нижче за температуру продуктів згорання в топковому просторі установки. Докладний аналіз методології розрахунку, результати числового й експериментального дослідження режимів і теплотехнічних характеристик двоступеневих високотемпературних ТА регенеративного типу, використовуваних для паливників НІТАС, наводяться в роботі [6]. Результати роботи підтвердили високу ефективність регенераторів з комірчастою структурою. Для прийнятих вихідних даних були отримані значення ефективності теплообмінника ε (85-95%) і коефіцієнта рекуперації + ERR (energy recovery ratio) (65-77%). Досліджено динаміку температур газового та повітряного потоків, динаміку температури комірчастої двоступеневої насадки, як функцій від періоду роботи регенератора. Результати роботи підтверджують вірність ідеї про використання високотемпературних компактних ТА з комірчастою структурою, в поєднанні з системою НІТАС, для підвищення енергетичної ефективності теплотехнічного обладнання. При цьому, стосовно до теплотехнологічних процесів варіння базальтового скла, температурні рівні яких перевищують рекомендовану максимальну температуру застосування насадка ТА, виникла необхідність дослідження режимів роботи і теплотехнічних характеристик високотемпературних компактних керамічних ТА з комірчастою структурою, що забезпечують їх тривалу роботу в складі технологічного обладнання.

Мета і задачі

Мета дослідження полягала у визначенні періоду роботи регенератора, при якому забезпечується його тривала експлуатація, і в побудові теплових і енергетичних показників ТА. В роботі використовувалися аналітичні, чисельні та експериментальні методи дослідження. Апробація результатів дослідження проводилася в період тривалої підконтрольної експлуатації на дослідно-промислових зразках обладнання.

Завдання дослідження полягали в розробці та апробації методики розрахунку розподілу температури в стінці насадка регенератора, як функції від часу. Побудові для найбільш теплонапружених ділянок роботи насадка регенератора залежності зміни температури поверхні насадка від часу його роботи. Визначенні часу роботи регенератора, при якому температура поверхні насадка не перевищує рекомендованої максимальної температури застосування для матеріалу насадка.

Матеріал та результати досліджень

Дані, що використовуються для побудови розрахункових моделей і проведення обчислень, наводяться в таблиці 1. Формулювання вихідних даних проводилося за результатами аналізу процесів варіння базальтового скла і роботи технологічного обладнання.

Витрати окислювача і продуктів згорання відрізняються на величину $\Delta\alpha$, обумовлену додатковою кількістю повітря на охолодження паликових пристроїв, шахти завантаження і елементів системи безпеки. Величина $\Delta\alpha$ не перевищує 0,3 одиниці. Загальна витрата природного газу в номінальному режимі роботи становила $B=5,7$ $\text{м}^3/\text{год}$. Витрата окислювача обчислювався при коефіцієнті надлишку повітря $\alpha = 1,2$ і становив $G_a = 85$ $\text{кг}/\text{год}$.

Витрата суміші продуктів згорання і повітря перед регенераторами обчислювався при коефіцієнті надлишку повітря $\alpha = 1,45$ і становив $G_g = 106$ $\text{кг}/\text{год}$.

Таблиця 1 – Вихідні дані

№ пп	Найменування позиції	Позначення	Од. вим.	Величина
1	Потужність модульної плавильної печі	Q	кВт (нм ³ /час)	60 5,7
2.	Величина тепловтрат в топковому просторі*	q_4	%	50-60
3.	Температура продуктів згоряння початкова	t_{gi}	°С	1500-1550
4.	Температура окислювача початкова	t_{ai}	°С	40
5.	Коефіцієнт надлишку повітря	α		1,3-1,5
	Характеристика насадку регенератора			
6.	Матеріал насадку			муллит
7.	Габаритні розміри насадку	$A*B*C$	м*м*м	0,15*0,15*0,30
8.	Кількість каналів насадку	$n*n$	шт.	13*13
9.	Товщина стінки насадку	d	м	0,0018
10.	Ширина каналу насадку	c	м	0,0095
11.	Вільний переріз для проходу газів	ε		0,68
12.	Площа поверхні теплообміну	F	м ²	2,1
13.	Питома площа поверхні теплообміну		м ² /м ³	314
14.	Площа для проходу газів	f		0,0153
15.	Вага насадку регенератора	m	кг	5
* - тепловтрати включають в себе – тепло на підігрів і плавлення базальтового сировини, потужність системи повітряного охолодження корпусу-теплообмінника, втрати з хімічним недожогом; рекуперативні втрати через огорожувальні поверхні.				

Модульна плавильна піч обладнана чотирма ТА, два з яких працюють на зарядку, і два – на розрядку. Кожен ТА складається з двох насадок, послідовно встановлених одна за одною. Загальна поверхня теплообміну одного ТА – 4,2 м². Щоб уникнути вибивання високотемпературних продуктів згоряння і підсмоктування надмірної кількості холодного повітря під час роботи, в топковому просторі печі підтримується тиск, близький до атмосферного.

Ефективність теплообмінника ε . Використовуючи критерій ефективності теплообмінника, введений в роботі [7], оцінимо його величину стосовно до умов роботи високотемпературного компактного ТА регенеративного типу для ванни плавильної печі.

$$\varepsilon = \frac{q}{q_{max}} = \frac{G_g \cdot (c_p)_g [t_{gi} - t_{go}]}{G_a \cdot (c_p)_a [t_{gi} - t_{ai}]}, \quad (1)$$

де q , q_{max} – кількість теплоти в одиницю часу фактично передане і максимально можливе, відповідно, Вт.

В якості аргументу використовуємо середню температуру газового потоку на виході з ТА t_{go} . Як можна бачити, при максимальній ефективності теплообмінника для температури t_{go} існує термодинамічна межа нижче якої температура продуктів згоряння знизитися не може, в припущенні, що вся теплота йде на нагрів окислювача (рисунок 2).

Стосовно до розглянутих випадків мінімальна температура продуктів згоряння t_{go} , відповідна максимальній ефективності теплообмінника, дорівнює 499 °С – крива 1 і 530 °С – крива 2.

Число одиниць переносу NTU. У каналах насадку регенератора переважає вимушена течія, обумовлена зовнішнім градієнтом тисків, вплив вільного руху не враховується. Число одиниць перенесення визначалося виразом –

$$NTU = \frac{k_{cp} \cdot F}{G_a \cdot (c_p)_a}, \quad (2)$$

де k_{cp} – середній коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м²°С).

Для обчислення локальних і середніх коефіцієнтів тепловіддачі в каналах насадку регенератора використовуємо рівняння, яке описує конвективний теплообмін при вимушеному русі в круглій трубі, при

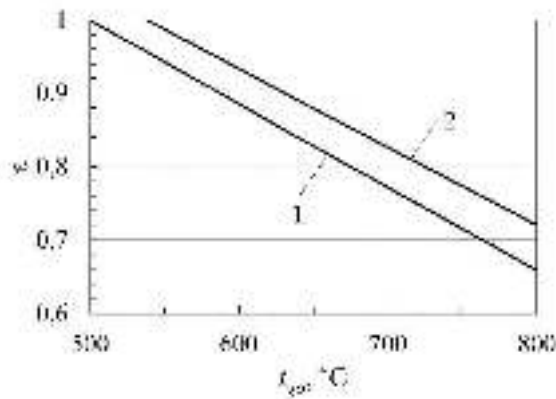


Рисунок 2 – Залежність ефективності теплообмінника від температури продуктів згоряння на виході з регенератора:

$$\alpha=1,2; \Delta\alpha=0,25; 1 - t_{gi}=1400 \text{ }^{\circ}\text{C}; 2 - t_{gi}=1500 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

постійних фізичних властивостях теплоносія, усталеній течії, початковій термічній ділянці і граничних умовах 2-го роду [8] –

$$Nu_x = 1,31 \left(\frac{1}{Re Pr} \cdot \frac{x}{X} \right)^{-\frac{1}{3}}, \quad (3)$$

де в якості характерного лінійного розміру (X) використовується гідравлічний діаметр каналу регенератора ($X=c$). На ділянці усталеної течії, після змикання температурних приграничних шарів, рівняння, що описує конвективний теплообмін при вимушеному русі і граничних умовах 2-го роду, приймає вигляд [8] –

$$Nu = \frac{48}{11} = 4,36. \quad (4)$$

Середнє значення числа Нусельта по довжині каналу визначалося шляхом інтегрування виразу для локального значення числа Нусельта:

$$Nu_{ave} = \frac{1}{L} \int_0^L Nu_x dx. \quad (5)$$

При виконанні обчислень, приймалися такі припущення.

Загальний час роботи регенератора (час циклу) визначалося за інтенсивністю нагріву (охолодження) його нижньої частини, що контактує з високотемпературними продуктами згоряння і охолоджуваною нагрітим повітрям, яка, таким чином знаходиться в найбільш теплонапружених умовах. При обчисленні часу циклу використовувалися значення теплофізичних характеристик матеріалу і середовищ, визначені для справжніх діапазону температур. Проводячи повірочний розрахунок теплообмінного апарату і обчислюючи кінцеві температури газових середовищ, всі визначальні теплофізичні характеристики приймалися за середніх температур діапазонів (або обумовлювалися окремо). Інтенсивність конвективного теплообміну між потоком продуктів згоряння і стінкою насадка (на вході в регенератор), в період зарядки, визначалася за середнім числом Нусельта (3), (5), усередненим на відстані одного калібру від входу в регенератор. Інтенсивність конвективного теплообміну при виконанні повірочного розрахунку ТА визначалася за середнім числом Нусельта, усередненим на всій довжині каналу регенератора. Для визначення властивостей газових середовищ попередньо задавалася ефективність регенератора. В подальшому, величина ефективності уточнювалася. Опираючись на результати роботи [6] є приймалася рівною 95%. Теплофізичні властивості газового середовища приймалися для середньої температури приграничного шару. Температура продуктів згоряння приймалася постійною і рівною t_{gi} , температура поверхні регенератора t_{reg} спочатку приймалася на $50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ вище температури окислювача на виході з регенератора t_{ao} і уточнювалася під час розрахунку. Також, як і в період зарядки, теплофізичні властивості газового середовища приймалися для середньої температури приграничного шару. Температура окислювача t_{ao} приймалася постійною, на $50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ нижче температури поверхні насадка t_{reg} . Далі, в результаті розрахунку значення t_{ao} і t_{reg} уточнювалися.

Результати розрахунків теплотехнічних характеристик процесу, необхідних для подальшого аналізу, представлені в таблиці 2.

На основі аналізу опублікованих даних [9-12] у подальших розрахунках приймаються наступні теплофізичні властивості мулітового регенератора:

коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·град) –

$$\lambda_{reg} = -26,45 \cdot 10^{-5}t + 2,42; \quad (6)$$

Таблиця 2 – Характеристики конвективного теплообміну в каналах насадка регенератора

№ пп	Найменування позиції	Позначення	Од. вим.	Величина	
				продукти згоряння	окислювач
1.	Середня швидкість потоку	w_i	м/с	5,1	0,7
2.	Число Рейнольдса у вхідному перерізі	Re_i		153	383
3.	Число Рейнольдса у вихідному перерізі	Re_o		<283	>200
4.	Число Прандтля у вхідному перерізі	Pr_i		0,525	0,699
5.	Число Прандтля у вихідному перерізі	Pr_o		<0,630	<0,730
6.	Температура				
	середня	t_{ave}	°C	873	873
	початкова	t_i	°C	1500	40
7.	Число Нусельта				
	середнє	Nu_{ave}		4,4	4,5
	початкове	Nu_i		6,7	9
8.	Коефіцієнт тепловіддачі			77	63
	середній	α_{ave}	Вт/(м ² °C)	46	35
	початковий	α_i	Вт/(м ² °C)	104	45
9.	Число одиниць переносу	NTU		6,2	

питома теплоємність, кДж/(кг·град) –

$$c_{reg} = 23,0 \cdot 10^{-5}t + 0,998; \quad (7)$$

густина, кг/м³ – $\rho=2310$;

коефіцієнт об'ємного розширення, К⁻¹ $\beta=6,2 \cdot 10^{-6}$.

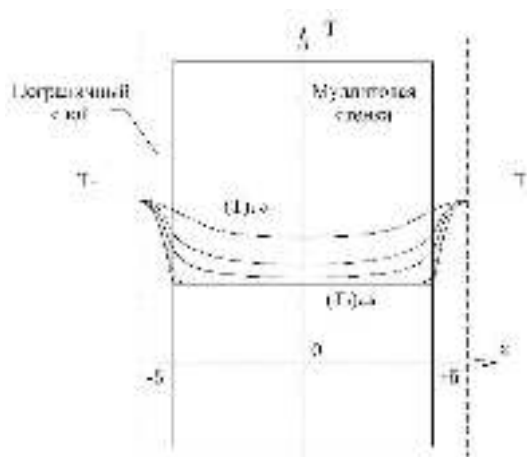


Рисунок 3 Розподіл температури в необмеженій пластині (симетрична задача)

В якості розрахункової моделі для визначення часу зарядки/розрядки регенератора розглядався випадок нагрівання необмеженої пластини [13] (рисунок 3). Товщина необмеженої пластини приймалась рівною 2δ , початковий розподіл температури в пластині – рівномірним – $T(x, 0)=T_0$. У початковий момент часу пластинка починає обдуватися середовищем з постійною температурою $T_g>T_0$. Теплообмін між обмежувачами поверхнями пластинки і навколишнім середовищем описувався законом Ньютона.

Диференціальне рівняння в частинних похідних описує розрахункову модель має вигляд:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (8)$$

Початкова умова формулювалася як :

$$\tau = \tau_0 = 0; \quad x \in [-\delta, +\delta]; \quad T(x, \tau) = T(x, 0) = T_0. \quad (9)$$

Граничні умови мають вигляд:

$$\tau > 0; \quad x = 0; \quad \left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x=0} = 0; \quad (10)$$

$$\tau > 0; \quad x = +\delta; \quad \lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x=+\delta} = \alpha [T_g - T(\delta, \tau)]. \quad (11)$$

Диференціальне рівняння в частинних похідних, приведенне до безрозмірного вигляду:

$$\frac{\partial \theta(X, Fo)}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 \theta(X, Fo)}{\partial X^2}, \quad (12)$$

де $\theta = \frac{T_w - T}{T_w - T_0}$ - безрозмірна температура, T_w, T_0 температура поверхні та центра насадка, відповідно;

$Fo = \frac{\alpha \tau}{\delta^2}$ - безрозмірний час (число Фур'є);

$X = \frac{x}{\delta}$ - безрозмірна координата.

Початкові і граничні умови після операції обезрозмірювання мають вигляд:

$$1) Fo = 0; \quad X \in [-1, +1]; \quad \theta = 1; \quad (13)$$

$$2) Fo > 0; \quad X = 0; \quad \left(\frac{\partial \theta}{\partial X}\right)_{X=0} = 0; \quad (14)$$

$$3) Fo > 0; \quad X = +1; \quad \left(\frac{\partial \theta}{\partial X}\right)_{X=1} = -Bi \cdot \theta_{X=1}. \quad (15)$$

Розв'язання задачі виконувалося методом Фур'є (розділення змінних [13]). Після перетворення рівняння приймало вигляд:

$$\frac{Z'(Fo)}{Z(Fo)} = \frac{Y''(X)}{Y(X)} = -\lambda^2. \quad (16)$$

Одержане співвідношення привело до двох звичайних диференціальних рівнянь (ЗДУ):

$$\begin{cases} Y''(X) + \lambda^2 Y(X) = 0; \\ Z'(Fo) + \lambda^2 Z(Fo) = 0. \end{cases} \quad (17)$$

Загальний розв'язок першого ЗДУ системи мав вигляд:

$$Y(X) = C1 \cos[\lambda X] + C2 \sin[\lambda X]. \quad (18)$$

Відповідно загальний розв'язок другого ЗДУ:

$$Z(Fo) = C3 \exp[-\lambda^2 Fo]. \quad (19)$$

Таким чином, загальний розв'язок системи (добуток двох частинних рішень) мав вигляд:

$$\theta(X, Fo) = C3 \exp[-\lambda^2 Fo][C1 \cos(\lambda X) + C2 \sin(\lambda X)]. \quad (20)$$

З другої ГУ знаходилася константа інтегрування - $C2=0$

Після підстановки $C2$, загальне рішення рівняння приймало вигляд:

$$\theta(X, Fo) = C \cos(\lambda X) \exp[-\lambda^2 Fo]. \quad (21)$$

Використовуючи третє ГУ, знаходилося значення константи розділення змінних λ :

$$\frac{\lambda}{Bi} = \text{ctg}(\lambda). \quad (22)$$

В результаті розв'язання трансцендентного рівняння одержувалася нескінченна множина значень константи λ , причому кожне подальше значення більше, ніж попереднє :

$$\lambda_1 < \lambda_2 < \lambda_3 < \dots < \lambda_n < \dots$$

Перші шість коренів λ_n табульовані і приведені у довідковій літературі для різних значень критерію Bi [14].

Таким чином, загальний розв'язок рівняння представляється сумою всіх часткових розв'язків:

$$\theta(X, Fo) = \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos(\lambda_n X) \exp[-\lambda_n^2 Fo]. \quad (23)$$

Постійна інтегрування C_n знаходилася з початкової умови:

$$C_n = \frac{2 \sin(\lambda_n)}{\lambda_n + \sin(\lambda_n) \cos(\lambda_n)}. \quad (24)$$

Підставляючи значення C_n , отримане для випадку рівномірного розподілу температури в пластині в початковий момент часу, в загальний розв'язок рівняння, отримували рішення диференціального рівняння в частинних похідних, що описує розрахункову модель :

$$\theta(X, Fo) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \sin(\lambda_n)}{\lambda_n + \sin(\lambda_n) \cos(\lambda_n)} \cos(\lambda_n X) \exp[-\lambda_n^2 Fo]. \quad (25)$$

При малих значеннях Bi ($Bi < 0,1$) швидкість нагрівання пластини визначається швидкістю перенесення тепла з навколишнього середовища до поверхні пластини. Вже при $Fo \geq 0,3$ ряд (25) стає таким, що сходиться настільки швидко, що розподіл температури досить точно описується першим членом ряду [15]:

$$\theta(X, Fo) = \frac{2 \sin(\lambda_1)}{\lambda_1 + \sin(\lambda_1) \cos(\lambda_1)} \cos(\lambda_1 X) \exp[-\lambda_1^2 Fo]. \quad (26)$$

Середня температура пластини визначалася виразами:

$$\theta_{ave} = \int_0^1 \theta(X, Fo) dX = \frac{4 \sin^2(\lambda_1) \exp[-\lambda_1^2 Fo]}{\lambda_1 (\sin(2\lambda_1) + 2\lambda_1)}, \quad (27)$$

$$\Theta_{ave} = \frac{T_w - T_{ave}}{T_w - T_0} \quad (28)$$

Нижче наводяться результати розрахунку профілів температури, як функції від лінійної координати і часу (рисунок 4). Можна бачити, що період прогріву стінки, під час якого необхідно враховувати характер розподілу температури, не перевищує $Fo \leq 2,5$ (рисунок 5). Вибираючи період зарядки / розрядки регенератора таким, щоб число Фур'є перевищувало величину $Fo=2,5$, можна, при проведенні аналізу не враховувати розподіл температури по перерізу стінки регенератора. Надалі, при обчисленні температури стінки регенератора малася на увазі середня температура T_{ave} . Зміна середньої температури стінки регенератора визначалася зі спільного розгляду рівнянь теплового балансу і теплопередачі:

$$Q(\tau) = m \cdot c_{reg}(t) \cdot (T_{ave} - T_0), \quad (29)$$

$$Q(\tau) = \alpha \cdot F \cdot (t_{gi} - T_0). \quad (30)$$

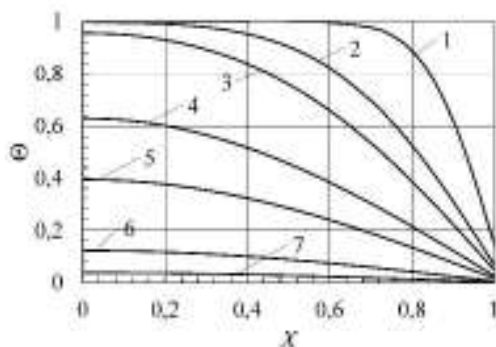


Рисунок 4 – Безрозмірні профілі температури в період зарядки/розрядки регенератора: $Bi < 0,05$; 1 – $Fo=0,01$; 2 – $Fo=0,05$; 3 – $Fo=0,1$; 4 – $Fo=0,3$; 5 – $Fo=0,5$; 6 – $Fo=1,0$; 7 – $Fo=1,5$.

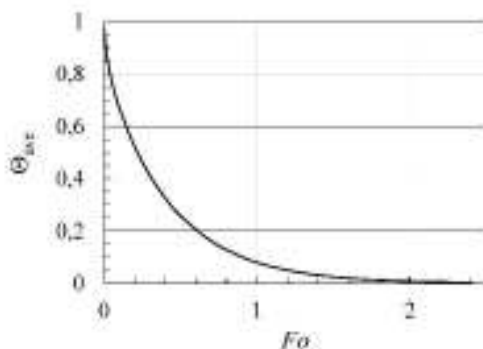


Рисунок 5 – Залежність середньої температури пластини від числа Фур'є

По черзі розглядалися періоди зарядки τ_{charge} і розрядки $\tau_{discharge}$ регенератора. Значення температури T_{ave} , отримане в кінці розрахунку одного періоду, приймалося в якості початкового значення для розрахунку другого періоду. Обчислення проводилися до моменту стабілізації температурних кривих, що характеризують періоди зарядки і розрядки регенератора.

Результати розрахунку, отримані для різних умов роботи ТА наводяться на рисунку 6.

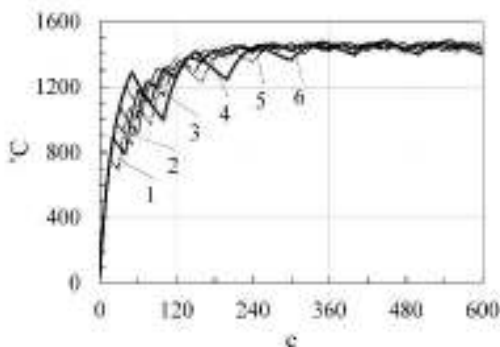


Рисунок 6 – Динаміка температури насадка регенератора у вхідному перерізі: $t_{gi}=1500 \text{ }^\circ\text{C}$; $t_{ao}=1300 \text{ }^\circ\text{C}$; 1 – $t=15 \text{ c}$; 2 – 20 c ; 3 – 25 c ; 4 – 30 c ; 5 – 40 c ; 6 – 50 c .

Різниця температур насадка на початку і кінці періоду роботи ТА зростає зі збільшенням періоду роботи:

$$\Delta T_{ave} = (T_{ave}^{max} - T_{ave}^{min})\tau. \quad (31)$$

На рисунку 7 (крива 1) наводиться безрозмірна величина $\varepsilon_{\Delta T_{ave}}$, яка визначається як відношення ΔT_{ave} до різниці температур газових потоків ($t_{gi} - t_{ao}$). Зменшення середньої температури насадка регенератора зі збільшенням періоду його роботи (рисунок 7, крива 2), дозволяє зробити припущення про одночасне зниження ефективності його роботи.

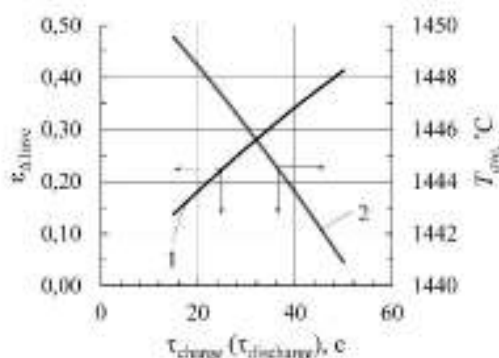


Рисунок 7 – Вплив періоду роботи на характеристики ТА:
 $t_{gi}=1500\text{ }^{\circ}\text{C}$; $t_{ao}=1300\text{ }^{\circ}\text{C}$; 1 – $\varepsilon_{\Delta T_{ave}}$; 2 – T_{ave} .

Стосовно до умов проведення промислового експерименту наводяться технічні показники ТА регенеративного типу – таблиця 3. Підтверджено високу ефективність ТА ($\varepsilon=0,95$), при цьому коефіцієнт рекуперативності має значення менше, ніж у роботі [6] ($ERR<0,56$), що викликано збільшенням коефіцієнта надлишку повітря у продуктах згоряння (іх розбавленням повітрям) і зниженням температури.

Вибір періоду роботи ТА, що задовольняє умові забезпечення допустимої температури тривалого застосування насадка стосовно до результатів, наведених у таблиці 3, показав, що тільки для одного технологічного режиму (варіант 1) вдається забезпечити умову $T_{ave}\leq 1480\text{ }^{\circ}\text{C}$ при $\tau_{charge}=\tau_{discharge}<20$ сек. Для решти режимів роботи температура поверхні насадка перевищує допустиме значення (до $50\text{ }^{\circ}\text{C}$), період роботи змінювався в діапазоні $5\leq\tau_{(dis)charge}<20$ сек.

Таблиця 1 – Теплотехнічні властивості ТА регенеративного типу з комірчастою структурою

№ пп	Найменування позиції	Позначення	Од. вим.	Варіанти		
				1	2	3
1.	Температура продуктів згоряння початкова	t_{gi}	$^{\circ}\text{C}$	1500	1525	1550
2.	Температура продуктів згоряння після ТА	t_{go}	$^{\circ}\text{C}$	532,2	541,3	549,1
3.	Температура повітря початкова	t_{ai}	$^{\circ}\text{C}$	40		
4.	Температура повітря після ТА	t_{ao}	$^{\circ}\text{C}$	1423,4	1446,9	1469,9
5.	Потужність ТА	Q	кВт	18,7	19,0	19,4
6.	Ефективність ТА	ε		0,95	0,95	0,95
7.	Коефіцієнт рекуперативності	ERR		0,56	0,56	0,56

Висновки

1. Підігрів окислювача до температур $1300\text{--}1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ дозволяє здійснювати процес плавки базальта і варки скла, при підвищених коефіцієнтах надлишку повітря – до 1,5 одиниць.

2. Реалізація принципу високотемпературного спалювання окислювача (НіТАС) в теплотехнології, з використанням компактних ТА регенеративного типу з комірчастою структурою і пальниками регенеративного типу, дозволяє підвищити енергетичну ефективність технологічного процесу.

3. Період прогріву стінки, під час якого необхідно враховувати характер розподілу температури, не перевищує $Fo\leq 2,5$.

4. Застосування муліту в якості матеріалу насадка регенератора з комірчастою структурою не дозволяє повною мірою задовольнити температурні умови технологічного процесу. Тільки в одному з

розглянутих випадків температура поверхні ТА не перевищувала допустимої температури тривалого застосування 1480 °С. Доцільно в якості насадка регенератора використовувати матеріал з допустимою температурою застосування 1525 °С і вище.

5. Розглянута конструкція високотемпературного компактного керамічного ТА регенеративного типу характеризується високими показниками ефективності ТА ($\epsilon=0,95$), коефіцієнта рекуперативності ($ERR=0,56$) і чисел переносу ($NTU=6,2$).

Література

1. Джигирис Д.Д. Основы производства базальтовых волокон и изделий / Д.Д. Джигирис, М.Ф. Махова. – М.: Теплоэнергетик, 2002. – 411 с.
2. Основы практической теории горения / под ред. В.В. Померанцева, Изд. 2-е, перераб. и доп. Ленинград, Энергоатомиздат, Ленинградское отделение, 1986. – 310 с.
3. Ткаченко О.О. Високотемпературні процеси та установки: Підруч. – К.: А.С.К., 2005. – 480 с.
4. Оснос С.П. Базальтовое непрерывное волокно – вчера, сегодня, завтра. Развитие технологий и оборудования, промышленных производств и сбыта / С.П. Оснос, М.С. Оснос // Композитный мир. – 2015. - №4. – С. 24-30.
5. Bengt Sunden High Temperature Heat Exchangers (HTHE) / Bengt Sunden // Proceedings of Fifth International Conference on Enhanced, Compact and Ultra-Compact Heat Exchangers: Science, Engineering and Technology, Eds. R.K. Shah, M. Ishizuka, T.M. Rudy, and V.V. Wadekar, Engineering Conferences International, Hoboken, NJ, USA, September 2005. – 226-238 pp.
6. Wlodzimierz Blasiak Thermal performance analysis on a two composite material honeycomb heat regenerators used for HiTAC burners / Nabil Rafidi, Wlodzimierz Blasiak // Applied Thermal Engineering. – 2005. №25(2005). – С.2966-2982. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2005.03.004
7. Кэйс В.М. Компактные теплообменники / В.М. Кэйс, А.Л. Лондон, Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Энергия, 1967. – 224 с.: ил.
8. Петухов Б.С. Теплообмен и сопротивление при ламинарном течении жидкости в трубах / Б.С. Петухов. – М.: Энергия, 1967. – 412 с.: ил.
9. Казанцев Е.И. Промышленные печи. Справочное руководство для расчетов и проектирования.
10. Расчет нагревательных и термических печей. Справочник под ред. Тымчака, Гусовского. – 1983.
11. Мастрюков Теплотехнические расчеты промышленных печей. – 1972.
12. Григорьев Физические величины. Справочник. – 1991.
13. Зайцев В.Ф., Полянин А.Д. Метод разделения переменных в математической физике. – СПб., 2009. – 92 с. – ISBN 978-5-94777-211-1
14. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М., Высшая школа, 1967. – С.600.
15. Исаченко В.П. и др. Теплопередача. Учебник для вузов, Изд. 3-е, перераб. и доп. М., «Энергия», 1975. – 488 с. с ил.

УДК 666.193; 66.047.37

Б.И. Басок, чл.-корр. НАН Украины, проф., д.т.н., **ORCID 0000-0002-8935-4248**
А.В. Тимошенко, к.т.н., **ORCID 0000-0001-6840-5491**
Институт технической теплофизики НАН Украины

ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИЙ КОМПАКТНИЙ КЕРАМІЧЕСЬКИЙ РЕГЕНЕРАТИВНИЙ ТЕПЛООБМЕННИЙ АППАРАТ

Ключевые слова: теплообменный аппарат, регенератор, энергоэффективность, базальтовые волокна. Предметом исследования выступает високотемпературный компактный керамический ТА с ячеистой структурой. Применительно к високотемпературным процессам плавки базальта и варки стекла рассматривается возможность его применения в системе високотемпературного сжигания окислителя. Отмечается, что подогрев окислителя преследует, как энергетическую, так и технологическую цели. Приводятся методики определения нестационарного температурного поля в стенке насадка регенератора и времени работы ТА из условия обеспечения допустимой температуры поверхности насадка. Установлено, что для диапазона числа Фурье $Fo \leq 2,5$ можно не учитывать распределение температуры в стенке насадка регенератора и оперировать его средней температурой. Приводятся характеристики компактных керамических ТА регенеративного типа, применительно к условиям проведения теплотехнологического процесса. Подтверждается их высокая эффективность. Определяется время работы ТА и его влияние на температуру поверхности насадка. Показано, что применительно к условиям проведения процессов плавки базальта и варки стекла, материал насадка ТА – муллит – не является оптимальным решением. Полученная

температура насадка регенератора превышает допустимую величину длительного применения. Апробация результатов исследования производилась на опытно-промышленных образцах ванн плавильных печей оборудованных системой HiTAC.

B. Basok, Cor. Mem. NAS of Ukraine, Prof., Dr. Eng. Sc., ORCID 0000-0002-8935-4248

A. Timoshchenko, Cand. Sc. (Eng.), ORCID 0000-0001-6840-5491

Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine

HIGH TEMPERATURE COMPACT CERAMIC REGENERATIVE HEAT EXCHANGER

Keywords: heat exchanger, regenerator, energy efficiency, basalt fibers.

The subject of the research is the high-temperature compact ceramic heat exchanger of a regenerative type with a honeycomb structure. In relation to high-temperature processes of basalt smelting and glass melting, the possibility of its application in a system of high-temperature air combustion is considered. It is noted that heating of the air pursues both energy goal – reduction of natural gas consumption, and technological goal – increasing the amount of free oxygen in the basalt processing zone. The methods of determining the transient temperature field in the wall of the solid heat-storing material of the regenerator and the operating time of the heat exchanger from the condition of ensuring the permissible surface temperature of the heat regenerator are given. It is established that for the range of the Fourier number $Fo \leq 2.5$, it is possible not to take into account the temperature distribution in the wall of the solid heat-storing material of the regenerator and to operate with its average temperature. Features of compact ceramic regenerative heat exchangers are given – heat exchanger efficiency, heat recovery coefficient, number of transfer units, power – as applied to the conditions of the heat engineering process. The heat exchanger efficiency is confirmed. The operating time of the heat exchanger and its effect on the surface temperature of the solid heat-storing material are determined. It is shown that in relation to the conditions of the basalt melting and glass melting processes, the material of the regenerative heat exchanger – mullite – is not an optimal solution. Only for one of the considered variants of the technological process, the surface temperature of the regenerative heat exchanger was lower than the permissible temperature of prolonged use of mullite. In other cases, the resulting temperature of the regenerator exceeded the permissible value of long-term use. It is advisable to use a material with a permissible temperature of application of 1525 °C and above as of the solid heat-storing material of the regenerator. Testing of the results of the research was carried out on pilot industrial samples of bath melting furnaces equipped with HiTAC (high-temperature air combustion system).

References

1. Dzhigiris D.D. *Osnovy proizvodstva bazal'tovykh volokon i izdeliy* / D.D. Dzhigiris, M.F. Makhova. – M.: Teploenergetik, 2002. – 411 s.
2. *Osnovy prakticheskoy teorii gorennya* / pod red. V.V. Pomerantseva, Izd. 2-ye, pererab. i dop. Leningrad, Energoatomizdat, Leningradskoye otdeleniye, 1986. – 310 s.
3. Tkachenko O.O. *Visokotemperaturni protsesi ta ustanovki: Pidruch.* – K.: A.S.K., 2005. – 480 s.
4. Osnos S.P. *Bazal'tovoye nepreryvnoye volokno – vchera, segodnya, zavtra. Razvitiye tekhnologiy i oborudovaniya, promyshlennykh proizvodstv i sbyta* / S.P. Osnos, M.S. Osnos // *Kompozitnyy mir.* – 2015. - №4. – S. 24-30.
5. Bengt Sunden *High Temperature Heat Exchangers (HTHE)* / Bengt Sunden // *Proceedings of Fifth International Conference on Enhanced, Compact and Ultra-Compact Heat Exchangers: Science, Engineering and Technology*, Eds. R.K. Shah, M. Ishizuka, T.M. Rudy, and V.V. Wadekar, Engineering Conferences International, Hoboken, NJ, USA, September 2005. – 226-238 pp.
6. Wlodzimierz Blasiak *Thermal performance analysis on a two composite material honeycomb heat regenerators used for HiTAC burners* / Nabil Rafidi, Wlodzimierz Blasiak // *Applied Thermal Engineering.* – 2005. №25(2005). – C.2966-2982. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2005.03.004
7. Keys V.M. *Kompaktnyye teploobmenniki* / V.M. Keys, A.L. London, Izd. 2-ye, pererab. i dop. – M.: Energiya, 1967. – 224 s.: il.
8. Petukhov B.S. *Teploobmen i soprotivleniye pri laminarnom techenii zhidkosti v trubakh* / B.S. Petukhov. – M.: Energiya, 1967. – 412 s.: il.
9. Kazantsev Ye.I. *Promyshlennyye pechi. Spravochnoye rukovodstvo dlya raschetov i proyektirovaniya.*
10. *Raschet nagrevatel'nykh i termicheskikh pechey. Spravochnik* pod red. Tymchaka, Gusovskogo. – 1983.
11. *Masteryukov Teplotekhnicheskkiye raschety promyshlennykh pechey.* – 1972.
12. Grigor'yev *Fizicheskkiye velichiny. Spravochnik.* – 1991.
13. Zaytsev V.F., Polyinin A.D. *Metod razdeleniya peremennykh v matematicheskoy fizike.* – SPb., 2009. – 92 s. – ISBN 978-5-94777-211-1
14. Lykov A.V. *Teoriya teploprovodnosti.* M., Vysshaya shkola, 1967. – S.600.

УДК 621.311.001

В.В. Каплун, докт. техн. наук, проф. ORCID 0000-0001-7040-9344
Національний університет біоресурсів і природокористування України
В.М. Штепа, канд. техн. наук, доц. ORCID 0000-0002-2796-3144
Поліський державний університет, Республіка Білорусь
С.С. Макаревич, канд. техн. наук, доц. ORCID 0000-0002-9601-5156
Національний університет біоресурсів і природокористування України

НЕЙРОМЕРЕЖЕВА МОДЕЛЬ ПРОГНОЗУВАННЯ ГЕНЕРАЦІЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ У СИСТЕМІ ЕНЕРГОМЕНЕДЖМЕНТУ ЛОКАЛЬНИХ ОБ'ЄКТІВ

Метою дослідження є обґрунтування та реалізація нейромережевої моделі для прогнозування генерації відновлюваними джерелами у системі енергоменеджменту локальних об'єктів.

Для створення інтелектуального прогностичного апарату використані нейромережеве моделювання, теорія обчислювального інтелекту та градієнтні оптимізаційні методи аналізу поведінки багатокомпонентних систем. У роботі обґрунтовані засади інтелектуального управління комбінованим електрозабезпеченням локальних об'єктів на основі нейромережевого прогнозування генерації електроенергії відновлювальними джерелами. Сформульовані принципи інтелектуального управління комбінованим електрозабезпеченням локальних об'єктів на основі умовного динамічного тарифу, що дало змогу користувачу узгоджувати графік електроспоживання у режимі реального часу за одним параметром. Також запропоновані алгоритм та структурно-логічна схема інтелектуального управління мікроенергетичними системами локальних об'єктів з традиційними і відновлюваними джерелами.

***Ключові слова:** локальний об'єкт, мікроенергетична система, відновлювані джерела, нейромережеве моделювання, умовний динамічний тариф, інтелектуальне управління.*

Вступ.

Однією з нагальних потреб економіки України є вирішення проблеми зменшення споживання енергетичних ресурсів. Відновлювані джерела енергії останнім часом стали системоутворюючими елементами комбінованих систем електроживлення. Однак, існуюча практика оперує лише фактичним даними про енергоспоживання за минулі періоди, що надзвичайно утруднює процес оперативного аналізу і, відповідно, ускладнює процеси прийняття управлінських рішень щодо оптимального використання енергоносіїв. Основою методології побудови комбінованих систем електроживлення з декількома різномірними джерелами у широкому сенсі є комплекс теоретично обґрунтованих процедур, спрямованих на підвищення енергоефективності електроспоживання локальних об'єктів. Створення та організація функціонування мікроенергетичних систем (МЕС) з традиційними і відновлюваними джерелами означає упорядкування її структури та алгоритмів функціонування за чітко визначеними характеристиками для формування енергетичного балансу з найменшою вартістю електроенергії.

Такий підхід є предметом загальної стратегії енергоменеджменту окремих об'єктів, оскільки при цьому стратегія електроспоживання повинна бути реалізована шляхом узгодження попиту і пропозиції. Баланс між власною генерацією і споживанням у межах мікроенергетичних систем локальних об'єктів повинен забезпечуватись виконанням певних правил, базовим принципом реалізації яких є забезпечення максимальної частки в енергобалансі МЕС відновлюваних джерел. Динамічне управління енергоспоживанням включає традиційні принципи на всіх рівнях розподілу енергоносіїв, об'єднує їх в інтегровану структуру для одночасного оптимального управління попитом, в першу чергу для зниження пікових навантажень. Це досягається удосконаленням системи енергоменеджменту на основі використання інтелектуальних кінцевих пристроїв і алгоритмів управління розподіленими енергоресурса-

© В.В. Каплун, В.М. Штепа, С.С. Макаревич, 2019

ми з високорозвиненими комунікаційними засобами, які здатні забезпечити оптимальне функціонування системи у реальному часі. Компоненти системи при цьому взаємодіють один з одним, створюючи інтегровану автоматизовану структуру управління, здатну до навчання.

У цій статті пропонується використовувати підхід аналізу потоку станів системи електроживлення з декількома джерелами та обраними струмоприймачами локального об'єкту для розроблення інтелектуальних алгоритмів формування енергетичного балансу МЕС з найнижчою вартістю електроенергії та узгодження генерації з графіком навантаження (попитом користувача).

Сучасні МЕС локальних об'єктів варто уявляти як єдині енергоінформаційні комплекси, в яких енергоефективність є ключовим чинником функціонування, і разом з тим забезпечуються належні показники надійності електроживлення, якості електроенергії, можливість її акумуляування, управління міжсистемними перетіканнями, сегментація, ієрархія силових енергетичних та інформаційних потоків, розподіл прийнятих управлінських рішень (поточних і перспективних) на основі прогнозування пропозиції та попиту на рівні локального об'єкту. Дослідження такого прототипу сучасних мікроенергетичних мереж створить умови для

подальшої модернізації електроенергетики на новій організаційній та інформаційно-технологічній основі.

Мета та завдання.

Виходячи із сучасного стану розвитку інтелектуалізації виробничих процесів, їх впровадження у енергетичний сектор, сформуємо технологічні завдання, які стосуються МЕС локальних об'єктів з декількома джерелами з існуючою системою енергоменеджменту. Серед таких завдань, які повинні/можуть вирішуватись (підтримувати вирішення) інтегрованою системою керування є [1]:

- децентралізований принцип формування балансу основного енергетичного модуля МЕС локального об'єкта з урахування генерації окремих джерел та керування потоками електроенергії до кінцевого струмоприймача;
- виключний принцип формування енергетичного балансу за рахунок генерації джерел з найменшою вартістю електроенергії;
- енергоінформаційний моніторинг стану мікроенергосистеми (попит/пропозиція) у реальному часі;
- можливість прийняття управлінських рішень автоматично та з урахуванням поточних вимог користувача для забезпечення мінімальних витрат на електрозабезпечення локального об'єкта.

Як було показано в [2], реалізації такого підходу можлива на основі використання умовного динамічного тарифу (УДТ) як інтегрального показника приведеної поточної вартості електроенергії основного енергетичного модуля локального об'єкта, який формується на основі реальної собівартості електроенергії кожного з джерел у заданому часовому інтервалі. Складність прогнозування УДТ МЕС з декількома джерелами обумовлена наявністю стохастичних складових при формуванні енергетичного балансу локального об'єкта з відновлюваними джерелами, розподіленістю архітектури МЕС та багатопараметричними взаємозв'язками між функціональними елементами, які у режимі реального часу можуть змінювати ступінь взаємного впливу [3].

Отже, обґрунтування інтелектуальних алгоритмів на основі нейромережевого моделювання прогнозування генерації відновлюваними джерелами у системі енергоменеджменту локальних об'єктів для подальшого параметричного синтезу автоматизованих систем управління (АСУ) комбінованим електрозабезпеченням локальних об'єктів є актуальним науково-практичним завданням.

Вихідними даними для завдання прогнозування сонячної енергії є багаторічна статистика, яка містить відомості про погодні умови і величину сонячного випромінювання. У роботі [4] розглядалися три незалежні сонячні станції, розташовані на різній висоті над рівнем моря та отримано адекватний прогноз у часовому інтервалі рівному 1 годині із застосуванням теорії статистичних рішень.

У якості методів вирішення аналогічного завдання у працях [5-7] ефективно застосовано штучні нейронні мережі (НМ) і метод опорних векторів для регресії (SVM). Аналізом статистичних даних було виявлено, що в залежності від сезону значення виробленої енергії можуть сильно відрізнятися, тому при побудові моделей недоцільно використовувати весь об'єм інформації: при прогнозуванні енергії у літні місяці не варто враховувати дані зимових місяців і навпаки. Також встановлено, що погода і обсяги виробленої енергії протягом кожного конкретного місяця в різні роки відрізняється незначно.

Разом із тим проблемою в інтеграції вітроенергетики в електричних мережах є нестабільність вітрового потоку [8]. Один з підходів для врахування мінливості вітрового потоку є прогнозування його майбутніх значень, що дозволить більш продуктивно управляти режимом роботи вітроенергетичної установки і інтегрувати її у загальну систему управління енергозабезпеченням. Із відомих засобів прогнозування існують [9]: фізичні (глобальні системи прогнозування, MM5, HIRLAM), статистичні (теорія опрацювання часових рядів (ЧР), інтелектуальні (штучні нейронні мережі, нечіткі системи, вейвлет-перетворення), гібридні (ANFIS). Всі описані методи володіють одним загальним недоліком – вони є

місцевими моделями, тобто модель розробляється під конкретну місцевість і досить складно застосовується (адаптується) для іншої; основні фактори, що викликають такий недолік та впливають на зміни графіків вітрогенерації: середня температура, швидкість вітру, кількість опадів.

Разом із тим більшістю авторів відмічено [5 – 9], що одним із найефективніших математичних апаратів щодо короткотривалого (до 1 години) прогнозу генерації від поновлюваних джерел (сонце і вітер) є саме апарат нейронних мереж [10].

На основі аналізу таких досліджень можна зробити висновок щодо доцільності вести прогнозування генерації на основі методів предикту часових рядів – оскільки останні інтегровано містять інформацію щодо всіх аспектів енергозабезпечення. Однак більшість із математичних засобів такого предикту або неприйнятні, або володіють недостатньою пізнавальною цінністю. Основним недоліком існуючих класифікаційних схем є порушення необхідних принципів класифікації [8]: достатньої повноти охоплення прогностичних методів, єдності класифікаційної ознаки на кожному рівні розподілу, відкритості.

При цьому доведено [7], що фактично всі моделі класичного статистичного аналізу часових рядів можуть бути реалізовані за допомогою нейронних мереж, оскільки певна залежність з безперервною нелінійною функцією може бути відтворена багатопаровою мережею [10]. Тобто замість того, щоб відображати поверхню у вхідному (фазовому) просторі, утворену даними за допомогою однієї гіперплощини (AR), кількох гіперплощин (TAR), або декількох гіперплощин, гладкоз'єднаних одна з одною (STAR), НМ може здійснити її довільне нелінійне відображення.

У порівнянні з класичними методами аналізу часових рядів НМ володіють певними перевагами [10]: постійна адаптація (оптимізація) власних параметрів із метою мінімізації прогностичної помилки в режимі реального часу; більш високі потенційні можливості при аналізі складних динамічних систем та закономірностей; здатність успішно вирішувати завдання, спираючись на неповну, викривлену, і внутрішньо суперечливу вхідну інформацію.

Матеріал і результати досліджень.

При розробці нейромережових моделей можна виділити два основних етапи:

- структурний синтез – вибір моделі НМ, її попередньої структури і алгоритму навчання;
- параметричний синтез – навчання НМ і перевірка отриманих результатів.

Залежно від результатів перевірки якості функціонування таких моделей приймається рішення про повернення на попередні стадії параметричного або навіть структурного синтезу. При цьому недостатня формалізованість описаних вище етапів призводить до виникнення цілого ряду проблем синтезу інтелектуальних структур.

Відповідно, важливим є коректне формування завдань нейромережового моделювання, наприклад, на основі об'єктно-орієнтованого моделювання (ООМ). Такий процес в UML (Unified Modeling Language) є ітеративним і паралельним, що, в свою чергу, забезпечує адаптивне коригування параметрів моделі шляхом реалізації відповідних циклів [10].

Тоді для системи енергоменеджменту локальних об'єктів із відновлюваними джерелами, у відповідності до прийнятих парадигм ООМ, констатуємо, що в системі є два «актори-людина» (рис. 1):

- інженер-технолог (інтегральний актор, який задає вимоги щодо категорії та потужності струмоприймачів і веде технологічний нагляд за роботою системи);
- черговий оператор (здійснює контроль за функціонуванням обладнання у відповідності до технологічного завдання).

Крім них до моделі включені «актори» у вигляді зовнішніх систем:

- інтелектуальний блок управління енергозабезпеченням (ІБУЕ);
- вимірювальний комплекс технічних засобів генерації сонячної електростанції (СЕС);
- вимірювальний комплекс технічних засобів генерації вітроелектричної станції (ВЕС);
- вимірювальний комплекс технічних засобів електроспоживання з централізованою енергосистемою (СЦЕП);
- вимірювальний комплекс технічних засобів генерації автономною електростанцією з двигуном внутрішнього згорання (АЕДВЗ);
- вимірювальний комплекс технічних засобів електроживлення статичного джерела живлення (ДБЖ);
- технічні засоби комутації (К);
- струмоприймачі (Ст), розділені на категорії у відповідності до технологічної карти системи енергоменеджменту (інтегральна зовнішня система);
- Інтерфейсний модуль із реалізацією технологій Інтернету речей (IoT).

При цьому, окремі вимірювальні блоки генеруючих елементів являються складовими елементами інтелектуального блоку (згідно концепції ООМ «агрегування») – включаючи апаратно-програмні засоби згідно їх паспортних даних.



Рис. 1 – Узагальнена структурно-логічна модель інтелектуального управління комбінованим енергозабезпеченням локальних об'єктів

Також інтелектуальний блок управління інтегрує (рис. 2):

- модуль управління енергопотоками згідно УДТ;
- модуль прогнозування електроспоживання;
- модуль прогнозування генерації вітросонячною станцією.

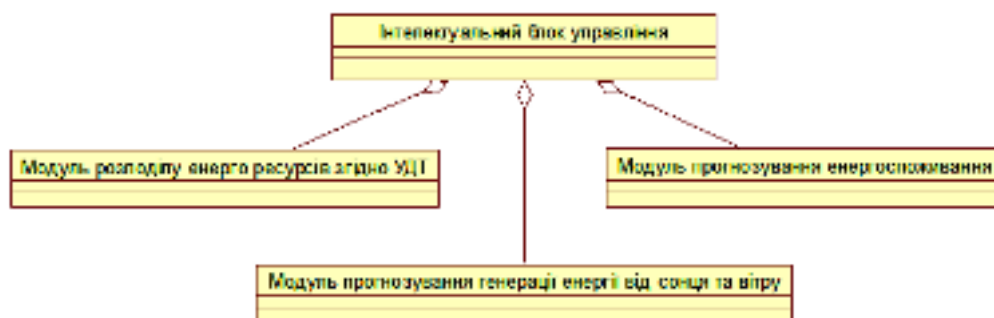


Рис. 2 – Склад інтелектуального блоку управління комбінованим енергозабезпеченням локальних об'єктів

Розподіл енергоресурсів (“Модуль управління енергопотоками згідно УДТ”) реалізовано з використанням математичного апарату ресурсно-процесної моделі [2, 3]. При цьому МЕС розглядається як система розподіленої обробки одночасно взаємодіючих конкуруючих процесів включаючи в себе p , $p \geq 2$, опрацьовуючи пристроїв з паралельними процесами, n , $n \geq 2$, розподілених конкуруючих взаємодіючих процесів, s , $s \geq 2$, блоків програмного ресурсу, матрицю $T = [t_{ij}]$, $i=\overline{1,n}$, $j=\overline{1,s}$, часів виконання блоків програмного ресурсу конкуруючими процесами. Параметр $\varepsilon > 0$ характеризує час, який витрачається енергомережею на паралельне використання блоків програмного забезпечення. Такий підхід являється базовим для вирішення завдань оптимізації змішаних режимів виконання паралельних процесів з розподіленою генерацією.

Математичне забезпечення прогнозування генерації та споживання електроенергії, реалізованого в «Модулі прогнозування енергоспоживання» (див. рис. 2), орієнтується на створення із використанням нейронних мереж, які формують вихідний сигнал (Y) відповідно з вхідним сигналом (X), реалізуючи деяку функцію: $Y = g(X)$. Якщо архітектура мережі задана, то вигляд функціональної залежності визначається величинами синаптичних ваг та зміщень мережі.

Позначимо через G множину всіх можливих функцій g , що відповідають заданій архітектурі мережі. Приймаючи, що розв'язанням деякої задачі є функція $v: Y = v(X)$, задана парами вхідних-вихідних даних $(X^1, Y^1), \dots, (X^k, Y^k)$, для яких $Y^k = v(X^k)$, $k = 1 \dots N$ (число елементів навчальної вибірки). Позначимо через E функцію помилки навчання нейромережі (функціонал якості), яка показує для кожної із функцій g ступінь близькості до v .

Вирішення даної задачі з допомогою певної НМ – це побудова функції g з множини G , підібравши значення синаптичних ваг та зміщення таким чином, щоб функціонал якості перетворювався на оптимум для всіх пар (X^k, Y^k)

Припустимо, що для навчання мережі використовується вибірка:

$$\begin{aligned}x^1 &= (x_1^1, x_2^1, \dots, x_n^1)^T, \quad y^1, \\x^2 &= (x_1^2, x_2^2, \dots, x_n^2)^T, \quad y^2, \\&\dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\x^N &= (x_1^N, x_2^N, \dots, x_n^N)^T, \quad y^N.\end{aligned}$$

де: y^k – значення бажаного (цільового) виходу.

Як функція помилки для k -го зразка (k -го елемента навчальної вибірки) прийемо величину, пропорційну квадрату різниці бажаного виходу y^k і виходу мережі o^k при використанні матриці вагових коефіцієнтів w^T :

$$E_k = \frac{1}{2} (y^k - o^k)^2 = \frac{1}{2} (y^k - o^k (w^T x^k))^2 = \frac{1}{2} (y^k - \frac{1}{1 + e^{-w^T x^k}})^2 \quad (1)$$

Відповідно, сумарна функція помилки за всіма елементами вибірки:

$$E = \sum_{k=1}^N E_k \quad (2)$$

Очевидно, як E_k так і E є функціями вектора вагів мережі w . Тоді задача навчання (адаптації) мережі зводиться у даному випадку до підбору такого вектора w , при якому досягається мінімум E . Таку задачу адаптації (оптимізації) можна вирішувати градієнтним методом, використовуючи співвідношення:

$$w := w - \eta E'_k(w), \quad (3)$$

де: « $:$ » – оператор присвоєння, $E'_k(w)$ – позначення вектора-градієнта, η – деяка константа.

Виходячи із досліджень авторів [11] для адаптації НМ при прогнозуванні ЧР доцільно застосовувати два оптимізаційні методи: Левенберга-Маркардта та Бroyдена – Флетчера – Гольдфарба – Шанно (BFGS).

Для першого із них напрямком пошуку визначається як рішення системи рівнянь виду:

$$(J_k^T J_k + \lambda_k I) p_k = -J_k^T Z_k, \quad (4)$$

де λ_k – деяке невід'ємне число, I – одинична матриця, J – матриця Якобі деякої вектор-функції Z ,

J^T – транспонована матриця J , G – матриця Гессе для Z .

У цьому методі крок p_k завжди задається одиничним, тобто черговою точкою $x_k + 1$ буде $x_k + p_k$. Можна показати, що p_k – рішення задачі на умовний мінімум:

$$\sum_k [J_k \bar{p} + Z_k]^2 \quad \text{при обмеженні} \quad \bar{p} < \Delta. \quad (5)$$

де Δ – параметр пов'язаний з λ_k .

Монотонне спадання функції, що мінімізується за методом Левенберга – Маркардта досягається за рахунок підбору значень λ_k . При λ_k що дорівнює нулю, p_k буде напрямком Гаусса-Ньютона. Коли λ_k прямує до нескінченності, p_k наближатиметься до нуля і при досягненні встановлених обмежень стає паралельним антиградієнту, отже, вибравши λ_k досить великим можна забезпечити виконання нерівності для суми квадратів неув'язок $S(\bar{X}_k + \bar{p}_k) < S(\bar{X}_k)$.

Нехай $p_{L,M}$ – рішення системи (4), при якихось x_k і позитивних λ_k . Якщо для матриці J_k умова лінійної незалежності стовпців виконується, то незалежно від величин Q_k і λ_k напрямком $p_{L,M}$ буде близько до напрямку p_{GN} в методі Гаусса – Ньютона.

Метод BFGS базується на оцінюванні кривизни цільової функції S вздовж \bar{s}_k , тобто похідна $\bar{s}_k^T G_k \bar{s}_k$ запишеться:

$$\bar{s}_k^T G_k \bar{s}_k \approx (g(\bar{X}_k + \bar{s}_k) - g_k)^T \bar{s}_k \quad (6)$$

До початку k -ої ітерації відома деяка апроксимація B_k матриці Гессе. Матриця B_k зберігає інформацію про кривизну функції, накопичену на попередніх $k-1$ ітераціях. Використовуючи B_k як матрицю Гессе, черговий напрямок \bar{p}_k квазіньютонівського пошуку визначається як рішення аналогічної (4) системи рівнянь:

$$B_k \bar{p}_k = -g_k, \quad (7)$$

Якщо немає додаткової інформації, то матриця B_0 приймається рівною одиничній матриці, при цьому перша ітерація квазіньютонівського методу буде еквівалентна алгоритму найшвидшого спуску.

Після визначення \bar{X}_{k+1} точки наближення B_k оновлюється з урахуванням знову отриманої інформації про кривизну, тобто відбувається перехід від матриці B_k до матриці $B_k + 1$, що задається формулою перерахунку виду:

$$B_{k+1} = B_k + U_k, \quad (8)$$

де U_k – деяка поправочна матриця.

Позначаючи $\bar{s}_k = (\bar{X}_{k+1} - \bar{X}_k) = \alpha_k p_k$, а приріст градієнта через $\bar{y}_k = g_{k+1} - g_k$ основна властивість всіх квазіньютонівських правил перерахунку (8) виражається рівністю:

$$B_{k+1} \bar{s}_k = \bar{y}_k, \quad (9)$$

У силу (6) рівність (9) означає, що $B_k + 1$ буде правильно відображати кривизну цільової функції S уздовж \bar{s}_k . Матриця Гессе є симетричною і позитивно визначеною, тому природно вимагати, щоб її квазіньютонівське наближення B_k володіло тими ж властивостями.

Перерахунок матриці $B_k + 1$ із (8) згідно методу BFGS адаптації НМ (вагів мережі ω) до вхідних даних виконується на основі виразу:

$$B_{k+1} = B_k - \frac{1}{\bar{s}_k^T B_k \bar{s}_k} B_k \bar{s}_k \bar{s}_k^T B_k + \frac{1}{y_k^T \bar{s}_k} \bar{y}_k \bar{y}_k^T + (\bar{s}_k^T B_k \bar{s}_k) \omega_k \omega_k^T \quad (10)$$

$$\omega_k = \frac{1}{\bar{y}_k^T \bar{s}_k} \bar{y}_k - \frac{1}{\bar{s}_k^T B_k \bar{s}_k} B_k \bar{s}_k.$$

Для адаптації (оптимізації) нейромережових моделей прогнозування генерації відновлюваних джерел із використанням методів Левенберга-Маркардта та Бройдена – Флетчера – Гольдфарба – Шанно (BFGS) застосовано пакет математичних прикладних програм STATISTICA 10. Стратегії побудови нейронних мереж тут такі: автоматизовані нейронні мережі (НМ), призначені для користувача НМ і метод багаторазових підвиборок; для вирішення проблеми перенавчання використовується механізм контрольної крос-перевірки (у нашому випадку із застосуванням методу Левенберга-Маркардта).

Із технологічних міркувань глибину прогнозу прийнято 30 хвилин (достатньо для реакції «Інтелектуального блоку управління» згідно ресурсно-процесного підходу (див. рис. 2).

Прогнозування виконувалось для генерації від сонячної енергетичної системи (СЕС) та вітроенергетичної системи (ВЕС): вибірка становила 624 точки (13 діб спостережень із дискретністю 30 хвилин) протягом місяця квітня у київському регіоні. Одиницею вимірювання для обох поновлюваних джерел прийняли потужність у Вт генерації встановленою потужністю 1кВт.

Спочатку опрацювали ЧР отриманої електроенергії від СЕС (рис. 3, 4), встановивши, що якість процесу прогнозування, який реалізовується використанням НМ, задовольняє технологічні вимоги щодо величини похибки предикту генерації від такого електротехнічного комплексу.

На основі аналізу якості прогнозування генерації від СЕС (див. рис. 3, 4) можна стверджувати, що адаптовані нейромережі можна використовувати при інтелектуальному управлінні МЕС: максимальна

середньоквадратична похибка опрацювання навчальної вибірки – 0,980214%, максимальна середньоквадратична похибка опрацювання тестової вибірки – 0,98674%.

SANN - Results: Генерація CEC-BEC

Active neural networks

Net. ID	Net. name	Training perf.	Test perf.	Algorithm	Error funct.	Hidden act.
1	MLP 1-7-1	0,979903	0,983659	BFGS 11	SOS	Logistic
2	MLP 1-6-1	0,979954	0,983470	BFGS 5	SOS	Identity
3	MLP 1-6-1	0,979793	0,983310	BFGS 18	SOS	Exponential
4	MLP 1-6-1	0,980214	0,983282	BFGS 41	SOS	Tanh
5	MLP 1-2-1	0,979819	0,983674	BFGS 7	SOS	Tanh

Рис. 3– Набір та характеристики адаптованих нейромереж прогнозування генерації CEC

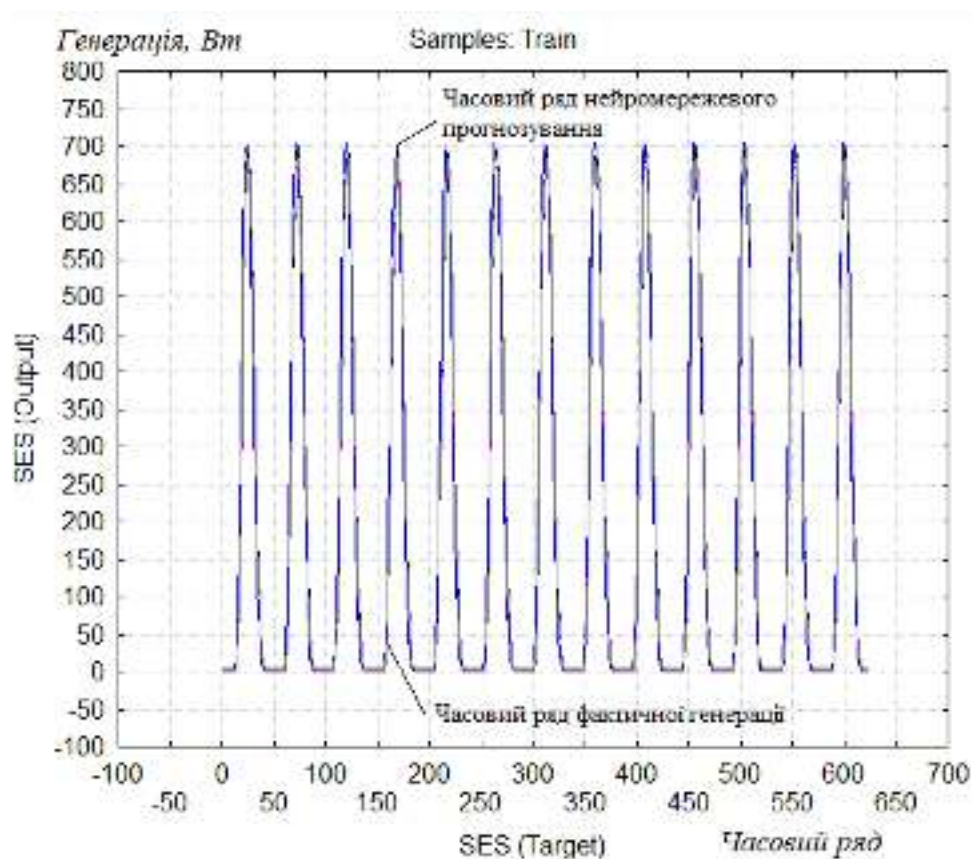


Рис. 4 – Результати нейромережевого прогнозування генерації CEC

При цьому узагальнена архітектура ефективної нейромережі являє собою багатошаровий перцептрон із одним прихованим шаром (кількість нейронів у ньому від 2 до 7), зміна функцій активації особливого впливу на якість предикту не продемонструвала.

Однак математичний апарат програмного забезпечення “Модуля прогнозування генерації вітросонячної станції” повинен враховувати виявлений недолік: при переході від нульової генерації (її відсутності вночі, наприклад) або при її різкому збільшенні НМ показує значне короткочасне погіршення якості предикту, можливо і до 50-70% (рис. 5).

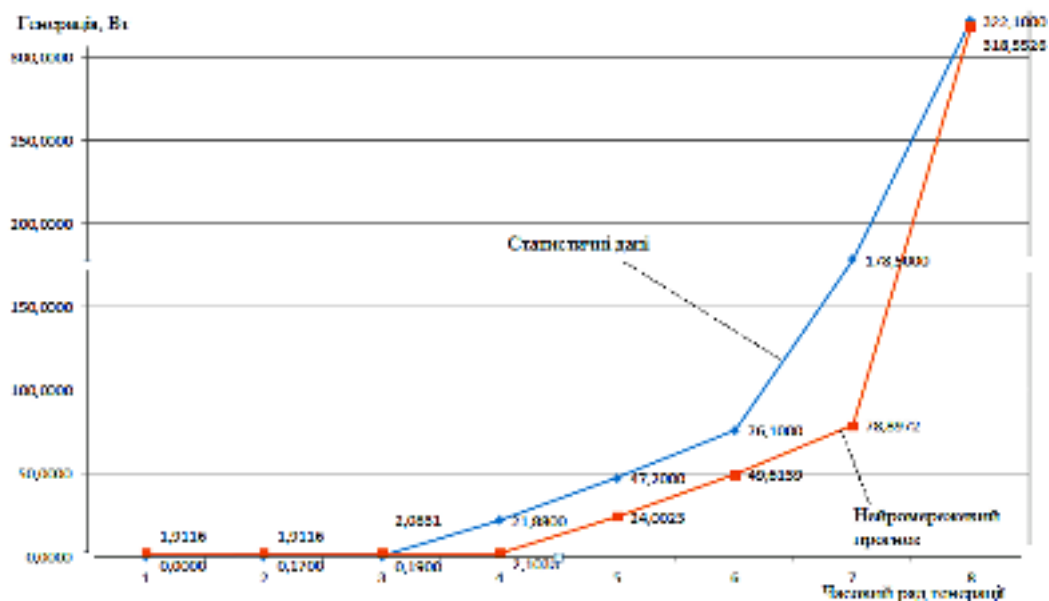


Рис. 5 – Приклад неймережевого прогнозування генерації СЕС при її різких амплітудних змінах (багаточаровий перцептрон із 7 нейронами у прихованому шарі)

Прогнозування ЧР отриманої електроенергії від ВЕС (рис. 6, 7) також продемонструвало технологічну ефективність для динамічного управління МЕС.

SANN - Results: Генерація СЕС-ВЕС

Active neural networks:

Net ID	Net name	Training perf.	Test perf.	Algorithm	Error funct.	Hidden-act.
1	MLP 1-3-1	0,748830	0,741389	BFGS 23	SOS	Tanh
2	MLP 1-3-1	0,756942	0,749034	BFGS 123	SOS	Tanh
3	RBF 1-51-1	0,863278	0,845811	RBFT	SOS	Gaussian
4	MLP 1-5-1	0,748523	0,742641	BFGS 65	SOS	Tanh
5	MLP 1-4-1	0,747714	0,749541	BFGS 57	SOS	Tanh

Рис. 6 – Набір та характеристики адаптованих неймережевого прогнозування генерації ВЕС

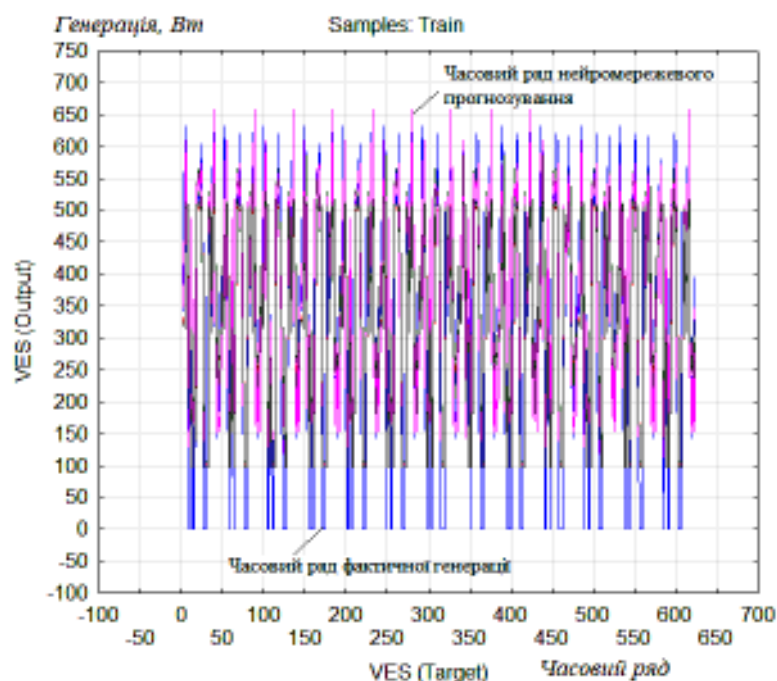


Рис. 7 – Результати неймережевого прогнозування генерації ВЕС

Аналогічно до нейромережевого прогнозування генерації від СЕС, стосовно ВЕС можна константувати, що адаптовані нейромережі доцільно використовувати при прогнозуванні генерації від вітру: максимальна середньоквадратична похибка опрацювання навчальної вибірки – 0,756942%, максимальна середньоквадратична похибка опрацювання тестової вибірки – 0,749334% (в обох випадках найгіршу якість із вибраних мереж продемонструвала НМ радіально-базисної функції).

Узагальнено: архітектура ефективної для прогнозування генерації від ВЕС НМ являє собою багат шаровий перцептрон із одним прихованим шаром (кількість нейронів у ньому від 2 до 6), зміна функцій активації особливого впливу на якість предикту також не продемонструвала.

При цьому виявлений недолік для прогнозування функціонування СЕС, ще більш чітко виражений для НМ-предиктів стосовно ВЕС: при переході від нульової генерації (її відсутності) або при її різкому збільшенні НМ показує значне короткочасне погіршення якості предикту, можливо і до 50-80% (див. рис. 7, рис. 8).

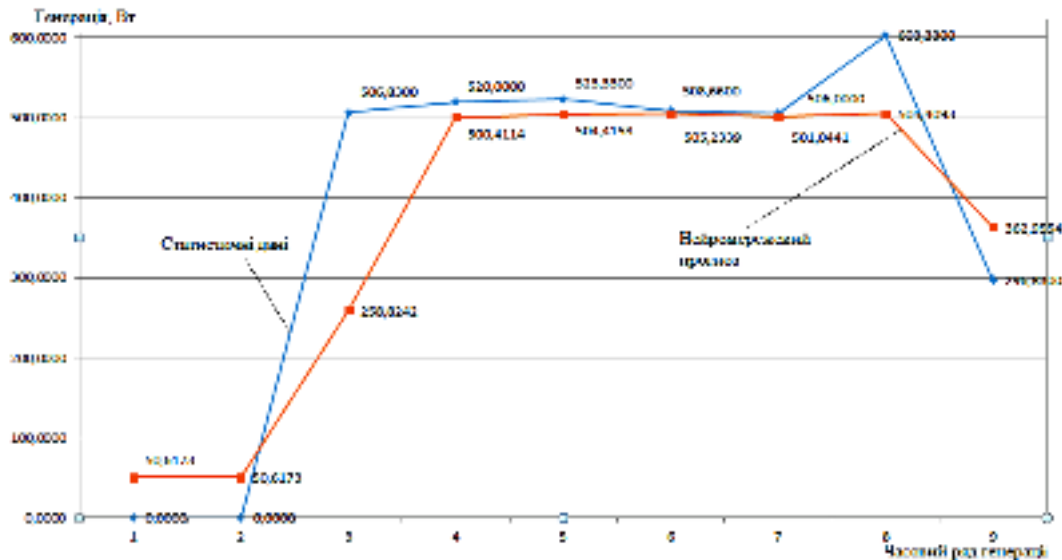


Рис. 8 – Приклад нейромережевого прогнозування генерації ВЕС при її різких амплітудних змінах (багат шаровий перцептрон із 3 нейронами у прихованому шарі)

Результати нейромережевого моделювання та їх використання для прогнозування генерації від поновлювальних джерел в цілому підтвердили ефективність таких підходів і їх доцільність застосування у «Модулі прогнозування генерації вітросонячної станції», та, відповідно, й при об'єктно орієнтованому «Модулі прогнозування електроспоживання» (див. рис. 2).

Тоді діаграма послідовності дій інтелектуального управління енергозабезпеченням локальних об'єктів на етапах запуску та прийняття рішень щодо зміни структурної схеми комутації технічного обладнання, включатиме послідовність (рис. 9):

1. Інженер-технолог ініціює запуск системи.
2. ІБУЕ передає інженеру-технологу графіки прогнозу нейромережевої моделі на основі попередньої статистики (при фільтрації інформаційних каналів з використанням перетворення Гільберта-Хуанга для усунення встановлених недоліків нейромережевих предиктів), а саме: генерації електроенергії (включаючи відновлювані джерела енергії), очікуваного споживання та передбачуваного УДТ. Часовий відрізок прогнозу – 30 хвилин.
3. Інженер-технолог приймає рішення стосовно прийнятності розрахунків, при необхідності вносить корективи, та дає команду на перехід у штатний режим (виробничий період функціонування після першого прогнозування генерації на основі очікуваного споживання до повної зупинки системи).
4. ІБУЕ розраховує схеми комутації згідно оптимального УДТ (на весь часовий період визначений інженером технологом).
5. ІБУЕ передає на локальні контролери налаштування режимів роботи.
6. ІБУЕ зберігає інформацію в базі даних.
7. З ІБУЕ у режимі синхронного повідомлення відправляється запит на локальні контролери стосовно відповідності протікання процесу раніше заданим режимам роботи (нотація UML). Інтелектуальний блок переходить у режим очікування – всі операції виконуються згідно попередньо розрахованих показників.

8. ІБУЕ отримує інформацію щодо невідповідності раніше прогнозованих і заданих генерації або/і споживання енергії її фактичним показникам.

9. ІБУЕ відправляє повідомлення інженеру-технологу щодо зміни структури комутації та новий графік оптимального УДТ. Повідомлення має структуру з відмовою на включення (нотація UML) – якщо не буде оперативної відповіді, то система працюватиме автономно.

10. ІБУЕ розраховує та видає команду на зміну схеми комутації.

11. ІБУЕ зберігає інформацію в базі даних.

12. ІБУЕ відправляє у режимі синхронного повідомлення (нотація UML) запит на локальні контролери стосовно відповідності протікання процесу раніше заданим режимам роботи.

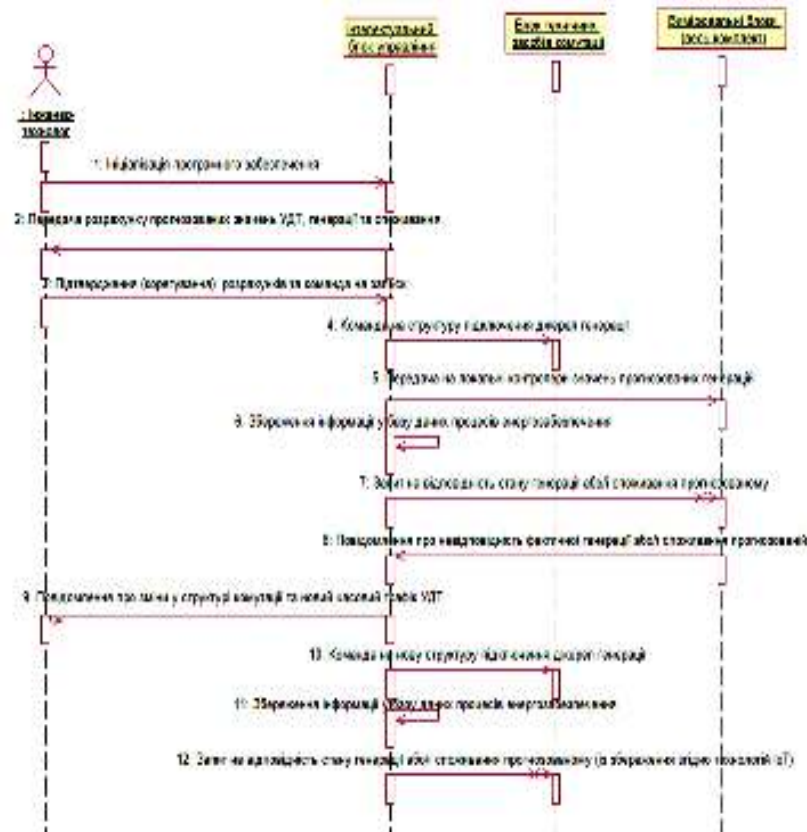


Рис. 9 – Діаграма послідовності (нотація UML) фрагменту інтелектуального управління комбінованим енергозабезпеченням локальних об'єктів із функцією прогнозування генерації відновлюваними джерелами

Ключовою перевагою такого підходу для реалізації інтелектуального управління комбінованим електрозабезпеченням локальних об'єктів є його адаптивність та здатність оперативно змінювати режими роботи в залежності від отриманих даних щодо прогнозів генерації відновлюваних джерел: особливості режиму електроспоживання (зміна графіка навантаження), потужність генерації відновлюваними джерелами тощо.

Висновки.

Ця стаття є продовженням досліджень, пов'язаних з аналізом структур комбінованих систем електроживлення шляхом забезпечення оптимального вибору потужностей традиційних та відновлюваних джерел для формування загального енергетичного балансу МЕС у системі енергетичного менеджменту локальних об'єктів.

Запропонований підхід щодо інтелектуального управління МЕС локальних об'єктів на основі нейромережевого прогнозування генерації електроенергії відновлюваними джерелами шляхом ресурсно-процесного моделювання з використання умовного динамічного тарифу. Результати дослідження враховують енергетичні та економічні чинники поведінки системи "вироблення електроенергії з відновлюваних джерел - графік споживання - динамічна ціна електроенергії". Розроблений метод заснований на системно-аналітичному аналізі поведінки складних багатокомпонентних систем із використанням статистичної інформації.

Встановлено, що архітектура ефективної для прогнозування генерації від СЕС нейромережі являє собою багаточаровий перцептрон із одним прихованим шаром (кількість нейронів у ньому від 2 до 7). Це

підтверджено якістю моделювання: максимальна середньоквадратична похибка опрацювання навчальної вибірки – 0,980214%, максимальна середньоквадратична похибка опрацювання тестової вибірки – 0,98674%.

Обґрунтовано, що для прогнозування генерації вітросонячною системою НМ доцільно використовувати багаточаровий перцептрон із одним прихованим шаром (кількість нейронів у ньому від 2 до 6); при цьому досягається якість моделювання: максимальна середньоквадратична похибка опрацювання навчальної вибірки – 0,756942%, максимальна середньоквадратична похибка опрацювання тестової вибірки – 0,749334%.

Реалізація моделі показала недолік нейромережевого прогнозування генерації від СЕС та ВЕС: при переході від нульової генерації (її відсутності) або при її різкому збільшенні НМ показують значне короточасне погіршення якості предикту (для СЕС – 50-70%, для ВЕС – 50-80%).

Одержані результати показали, що використання УДТ як інтегрального показника поточної вартості електроенергії дає змогу знайти найбільш ефективне поєднання спроможності генерації відновлюваних джерел для забезпечення графіка електроспоживання і мінімізації витрат на електрозабезпечення локальних об'єктів.

В подальшому одержані результати нейромережевого моделювання будуть використані для розроблення алгоритмів автоматизованих систем управління МЕС з декількома джерелами, їх програмної та апаратної реалізації з адаптацією до управління у реальному часі.

Список використаних джерел

1. European Smart Grids Technology Platform. Vision and Strategy for Europe's Electricity Networks of the Future. – Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2006.
2. Каплун В. В. Умовний динамічний тариф як критерій ефективності функціонування мікроенергетичних систем локальних об'єктів / В. В. Каплун // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія : Технічні науки. - 2016. - № 3. - С. 50-58.
3. Каплун В.В. Ресурсно-процесний підхід к построению математической модели микроэнергетической системы / В. В. Каплун, П. А. Павлов, В. Н. Штепа // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія "Технічні науки" : рецензований науковий журнал. – 2016. – № 2. – С. 48-60.
4. Global Energy Forecasting Competition 2014: Probabilistic Solar Power Forecasting [Електронний ресурс]. URL: <https://www.crowdanalytix.com/contests/global-energy-forecasting-competition-2014-probabilistic-solar-power-forecasting> (date of appeal: 29.07.2019)
5. Brester Ch. Yu., Semenkin E. S. Development of adaptive genetic algorithms for neural network models multicriteria design // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М. Ф. Решетнева. 2013. № 4 (50). С. 99–103.
6. Cortes C., Vapnik V. N. Support-Vector Networks // Machine Learning, 20, 1995.
7. Smola A. J., Schoelkopf B. A tutorial on support vector regression. Statistics and Computing, 1998.
8. Y-K Wu, and J-S Hong, "A literature review of wind forecasting technology in the world," IEEE Power Tech 2007, Lausanne , pp. 504-509, 1-5 July 2007.
9. "Load Forecasting" Chapter 12, E.A Feinberg and Dora Genethlio, Page 269 – 285
10. Круглов В.В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика / В.В. Круглов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2002. – 382 с.
11. Нейромережеве прогнозування часових рядів температури навколишнього природного середовища / В.П. Лисенко, Н.А. Заєць, В.М. Штепа, А.О. Дудник // Біоресурси і природокористування: наук. журн. – 2011. – Т. 3, № 3-4. – С. 102-108.

V. Kaplun, Dr.Eng.Science, Prof. **ORCID** 0000-0001-7040-9344
National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine
V. Shtepa, Assoc. Prof. **ORCID** 0000-0002-2796-3144
Polesky State University
S. Makarevych, Assoc. Prof. **ORCID** 0000-0002-9601-5156
National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine

NEURO-NETWORK MODEL FOR PROVIDING ELECTRICITY GENERATION BY RENEWABLE SOURCES IN ENERGY MANAGEMENT SYSTEM OF LOCAL OBJECT

The paper provides continuation research related to the analysis of the structures of combined power systems. It's considered with regard the choice of the model line of power traditional and renewable sources for forming energy balance microgrid system to increase the efficiency of management energy local objects.

The research is to substantiate and implement a neural network model to predict the generation of electricity from renewable sources to develop intelligent algorithms for the energy management system of local objects. Neural network modeling, theory of computational intelligence, and gradient optimization methods for analyzing the behavior of multicomponent systems were used to create an intelligent prognostic apparatus.

The principles of intelligent management combined power supply of local objects based on neural network prediction of electricity generation by renewable sources are substantiated. The paper is proposed basic algorithms for the system of energy management of local objects.

By means of neural network prediction electricity generation by renewable sources, the basic theoretical principles of creation of the system of intellectual control of the combined electric supply of local objects based on a conditional dynamic tariff are formulated.

It is given based to allow users conditional dynamic tariff to reconcile real-time power schedules with one parameter.

The propose a neural network model for a combined power system with a wind- solar power plant to develop algorithms and structural and logical diagram of intelligent management power consumption local object with heterogeneous sources is allowed. It's based to use statistics of daily electricity generation with half-hour discrete energy.

References

1. European Smart Grids Technology Platform. Vision and Strategy for Europe's Electricity Networks of the Future. – Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2006.
2. Kaplun V. V. Umovnyi dynamichniy taryf yak kryterii efektyvnosti funktsionuvannya mikroenerhetychnykh system lokalnykh ob'ektiv / V. V. Kaplun // Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnolohii ta dyzainu. Seriiia : Tekhnichni nauky. - 2016. - № 3. - S. 50-58.
3. Kaplun V.V. Resursno-protsessnyi podkhod k postroenyiu matematycheskoi modely mykroenerhetycheskoi systemy / V. V. Kaplun, P. A. Pavlov, V. N. Shtepa // Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnolohii ta dyzainu. Seriiia "Tekhnichni nauky" : retsenzovanyi naukovyi zhurnal. – 2016. – № 2. – S. 48-60.
4. Global Energy Forecasting Competition 2014: Probabilistic Solar Power Forecasting [Електронний ресурс]. URL: <https://www.crowdanalytix.com/contests/global-energy-forecasting-competition-2014-probabilistic-solar-power-forecasting> (дата звернення: 29.07.2019)
5. Brester Ch. Yu., Semenkin E. S. Development of adaptive genetic algorithms for neural network models multicriteria design // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М. Ф. Решетнева. 2013. № 4 (50). С. 99–103.
6. Cortes C., Vapnik V. N. Support-Vector Networks // Machine Learning, 20, 1995.
7. Smola A. J., Schoelkopf B. A tutorial on support vector regression. Statistics and Computing, 1998.
8. Y-K Wu, and J-S Hong, "A literature review of wind forecasting technology in the world," IEEE Power Tech 2007, Lausanne, pp. 504-509, 1-5 July 2007.
9. "Load Forecasting" Chapter 12, E.A Feinberg and Dora Genethlio, Page 269 – 285
10. Kruhlov V.V. Yskusstvennye neironnyye sety. Teoriya y praktyka / V.V. Kruhlov. – M.: Horiachaia lynyia – Telekom, 2002. – 382 s.
11. Neiomerezheve prohnozuvannya chasovykh riadiv temperatury navkolyshnoho pryrodnoho seredovyscha / V.P. Lysenko, N.A. Zaiets, V.M. Shtepa, A.O. Dudnyk // Bioresursy i pryrodokorystuvannya: nauk. zhurn. – 2011. – Т. 3, № 3-4. – S. 102-108.

УДК 621.311.001

В.В. Каплун, докт. техн. наук, проф. **ORCID** 0000-0001-7040-9344
Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины
В.М. Штепа, канд. техн. наук, доц. **ORCID** 0000-0002-2796-3144
Полесский государственный университет, Республика Беларусь
С.С. Макаревич, канд. техн. наук, доц. **ORCID** 0000-0002-9601-5156
Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины

НЕЙРОСЕТЕВАЯ МОДЕЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ГЕНЕРАЦИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ В СИСТЕМЕ ЭНЕРГОМЕНЕДЖМЕНТА ЛОКАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ

Целью исследования является обоснование и реализация нейросетевой модели для прогнозирования генерации возобновляемыми источниками в системе энергоменеджмента локальных объектов.

В статье обоснованы принципы интеллектуального управления комбинированным электрообеспечением локальных объектов на основе нейросетевого прогнозирования генерации

электроэнергии возобновляемыми источниками. Сформулированы принципы интеллектуального управления комбинированным электрообеспечением локальных объектов на основе условного динамического тарифа, что позволило пользователю согласовывать график электропотребления в режиме реального времени по одному параметру. Также предложены алгоритм и структурно-логическая схема интеллектуального управления микроэнергетическими системами локальных объектов с традиционными и возобновляемыми источниками.

Ключевые слова: локальный объект, микроэнергетическая система, возобновляемые источники, нейросетевое моделирование, условный динамический тариф, интеллектуальное управление.

Надійшла 01.05.2019

Received 01.05.2019

УДК 536.24:533.6.011

А. М. Терех, к.т.н., с. н. с., **ORCID** 0000-0002-1320-8594

А. В. Баранюк, к.т.н., доц., **ORCID** 0000-0001-6008-6465

В. А. Кондратюк, к.т.н., доц., **ORCID** 0000-0001-5035-311X

В. А. Рогачев, к.т.н., доц., **ORCID** 0000-0001-5489-874X

А. И. Руденко, к.т.н., доц., **ORCID** 0000-0002-8541-9710

**Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»**

ТЕПЛООБМЕН ПОПЕРЕЧНО-ОМЫВАЕМЫХ ПАКЕТОВ ПЛОСКООВАЛЬНЫХ ТРУБ

Выполнены экспериментальные исследования конвективного теплообмена шахматных пакетов плоскоовальных труб при поперечном их обтекании воздушным потоком в диапазоне изменения чисел Рейнольдса $2000 < Re_{d1} < 30000$ при варьировании относительного удлинения профиля плоскоовальной трубы d_2/d_1 от 2 до 5, а отношение поперечного шага труб к продольному S_1/S_2 варьировалось от 0,4 до 1,45. Установлено влияние геометрических и режимных параметров на теплообмен пакетов. Интенсивность теплообмена шахматных пакетов плоскоовальных труб при варьировании удлинения профиля труб d_2/d_1 в пределах от 2 до 5 изменяется на (10-25)%, а при варьировании шаговых характеристик труб при $d_2/d_1 = \text{const}$ на (8-12)%. Предложены расчетные соотношения для определения коэффициентов теплообмена шахматных пакетов плоскоовальных труб, учитывающие влияние на теплообмен режимных параметров, геометрических характеристик плоскоовальных труб и пакетов и могут быть использованы при расчете теплообмена воздухоподогревателей котельных агрегатов, регенераторов газотурбинных установок.

Ключевые слова: теплообмен, исследование, плоскоовальная труба, шахматный пакет, расчет, обобщенные соотношения.

Введение. Важным направлением решения задач ресурсо- и энергосбережения в теплоэнергетике является разработка и внедрение новых видов конвективных трубчатых поверхностей теплообмена, которые отличаются высокой теплоаэродинамической эффективностью, в отличие от поверхностей из труб круглой формы, которые с точки зрения улучшения их тепловых и аэродинамических характеристик, на сегодняшний день себя практически исчерпали, а также технологичностью и невысокой стоимостью производства. Такими поверхностями теплообменных устройств могут быть пакеты из труб удобообтекаемой формы: овальной, плоскоовальной, двугульной, каплеобразной, которые обладают рядом существенных преимуществ перед трубами круглого профиля и прежде всего в 2-3 раза меньшим аэродинамическим сопротивлением при практически одинаковых теплоотдающих характеристиках. Однако, до настоящего времени не существует надежных расчетных зависимостей для определения коэффициентов теплообмена пакетов из таких труб в широком диапазоне изменения их режимных и геометрических характеристик, что затрудняет их использование в качестве теплообменных поверхностей.
© А. М. Терех, А. В. Баранюк, В. А. Кондратюк, В. А. Рогачев, А. И. Руденко, 2019

С учетом вышесказанного в „КПИ им. Игоря Сикорского” проведены экспериментальные исследования теплообмена шахматных пакетов плоскоовальных труб в широком диапазоне изменения режимных параметров потока, геометрических характеристик труб и пакетов, выполнено обобщение экспериментальных данных и предложены расчетные соотношения для определения коэффициентов теплообмена при поперечном их омывании воздушным потоком.

Цель работы. Цель данной работы состояла в создании обобщенных соотношений для расчета конвективных коэффициентов теплообмена шахматных пакетов плоскоовальных труб на основе полученных экспериментальных данных для рекуперативных теплообменных аппаратов типа „газ-газ” в широком диапазоне изменения геометрических характеристик труб, пакетов и режимных параметров потока.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

– определено влияние на теплообмен геометрических параметров: относительного удлинения профиля трубы d_2/d_1 (отношения продольного к поперечному размеру трубы) и шаговых характеристик труб пакетов (поперечного шага S_1 и продольного S_2 ;

– получены обобщенные расчетные соотношения для определения коэффициентов теплообмена шахматных пакетов плоскоовальных труб при поперечном их обтекании в широком диапазоне изменения геометрических характеристик труб и пакетов.

Анализ литературных источников. Трубы удобообтекаемого профиля известны давно. Упоминание об исследованиях теплообмена и аэродинамического сопротивления пакетов из таких труб можно встретить в работах [1-3]. Поверхности таких труб имеют в 1,5-2 раза меньшее аэродинамическое сопротивление при незначительно меньшей (на 15-25%) интенсивности теплообмена по сравнению с трубами круглого поперечного сечения [4-5]. Поэтому теплоаэродинамическая эффективность поверхностей из профилированных труб

существенно выше, чем у поверхностей из труб круглого профиля, которые с точки зрения увеличения теплоаэродинамической эффективности, себя исчерпали. Она характеризуется взаимосвязью между отведенным количеством теплоты и энергией, затраченной теплоносителем на преодоление сопротивления. Сравнение поверхностей между собой (или с эталонной) и выявления из них более эффективной, осуществляется путем установления взаимосвязи между теплообменом и аэродинамическим сопротивлением при равенстве чисел Рейнольдса с возможным привлечением сведений о массо-габаритных характеристиках сравниваемых объектов.

В последнее время появилось несколько публикаций из Ирака, Индии, Малайзии, в которых приводятся результаты экспериментальных и численных исследований теплообмена шахматных и коридорных пакетов плоскоовальных труб [6-9].

В публикации [6] при помощи численного моделирования проведены исследования теплообмена шахматных и коридорных пакетов плоскоовальных труб при низких числах Рейнольдса ($Re_e = 25...400$). Авторы констатируют, что интенсивность теплообмена коридорных пакетов выше, чем шахматных при любых сравниваемых относительных шагах между трубами, что на наш взгляд сомнительно. В работе найдены оптимальные значения относительных шагов между трубами для обоих типов компоновок труб. В публикации не приведены абсолютные значения геометрических характеристик труб и пакетов, что затрудняет использование полученных результатов при сравнении с результатами других авторов.

В работе [7], как и в [6] представлены исследования теплообмена шахматных и коридорных пакетов плоскоовальных труб с помощью численного моделирования в более широком интервале изменения чисел Рейнольдса ($Re_e = 100...8000$) при варьировании относительных поперечных шагов между трубами ($\sigma_1 = 2; 3; 4$) и продольных ($\sigma_2 = 5; 6; 7$). Проанализировано влияние на теплообмен шаговых характеристик труб при неизменной геометрии самих труб ($d_2/d_1 = 2$). Показано, что для двух типов компоновок имеет место слабое влияние на интенсивность теплообмена шаговых характеристик труб пакета. Результаты численного моделирования экспериментально не подтверждены.

В публикации [8] приведены результаты экспериментальных исследований теплообмена при ламинарном режиме течения для четырехрядного шахматного пакета плоскоовальных труб при поперечном обтекании воздухом в очень узком диапазоне варьирования скорости потока, которая изменялась от 0,6 м/с до 1,0 м/с ($Re_e = 350-650$). Исследования проведены в аэродинамической трубе разомкнутого типа в условиях полного теплового моделирования (обогревались все трубы пакета). Трубы изготовлены из алюминия размерами $d_1 = 10$ мм, $d_2 = 18,5$ мм ($d_2/d_1 = 1,85$). В работе не указаны значения шагов между трубами, что не дает возможности сравнения полученных результатов с результатами других авторов. Авторами [8] предложено расчетное соотношение для определения чисел Нуссельта в виде степенной функции

$$Nu = C_1 \cdot Re_e^{C_2} . \quad (1)$$

Там же приведены величины коэффициента C_1 и показателя степени C_2 для различных значений суммарной плотности теплового потока для всего пакета труб, которые после оптимизации полученных данных приняли следующие значения: $C_1 = 0,44$; $C_2 = 0,61$. Величина показателя степени C_2 при числе Рейнольдса в ламинарной области течения должна быть близкой к 0,5, а не 0,61, что подтверждается работами Жукаускаса А. А. [9] по исследованию теплообмена одиночных круглых труб, шахматных и коридорных пакетов в ламинарной области течения.

В [10] представлены результаты экспериментального исследования теплообмена четырехрядного коридорного пакета плоскоовальных труб в диапазоне изменения чисел Рейнольдса от 500 до 900 (режим ламинарного течения) в условиях полного электрообогрева всех труб пакета. Трубы имели те же размеры, что и в работе [8]. Как и в статье [8], не приведены значения поперечного и продольного шагов между трубами. В публикации представлена расчетная зависимость для определения среднего коэффициента теплообмена коридорного пакета труб в виде степенной функции

$$Nu_c = 0,242 \cdot Re_c^{0,702}. \quad (2)$$

На наш взгляд значение показателя степени 0,702 при числе Рейнольдса вызывает сомнение, так как при ламинарном режиме течения показатель степени при числе Рейнольдса должен быть близким к 0,5 [9].

Из вышесказанного следует, что системных исследований влияния геометрических и шаговых характеристик труб на теплообмен и аэродинамическое сопротивление пакетов плоскоовальных труб при поперечном их омывании в широком диапазоне изменения чисел Рейнольдса, не проводилось. Результаты численного моделирования экспериментально не подтверждены. В опубликованных работах содержатся отрывочные данные, которые носят, как правило, частный характер.

Методика исследований. Исследования конвективного теплообмена шахматных пакетов плоскоовальных труб (рис. 1, 2) при поперечном их обтекании воздушным потоком осуществлялись на экспериментальной установке, которая представляет собой аэродинамическую трубу разомкнутого типа прямоугольного сечения, работающая на всасывание высотой и шириной, соответственно 140 мм и 210 мм, (рис. 3, рис. 4). Проточная часть установки состояла из рабочего и двух успокоительных участков. Через переходной диффузор проточная часть соединялась с входным соплом диаметром 75 мм, спрофилированным по лемнискате. Другим концом проточная часть через переходной конфузор присоединялась к всасывающему отверстию высоконапорного вентилятора производительностью 0,42 м³/с и напором до 4,0 кПа. Расход воздуха через вентилятор плавно регулировался шибером с винтовым приводом. Рабочий участок установки представлял собой канал длиной 700 мм.



Рисунок 1 – Плоскоовальные трубы различного удлинения профиля

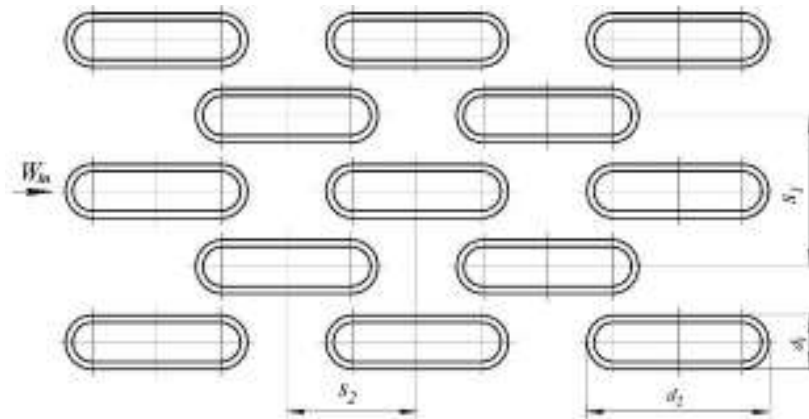


Рисунок 2 – Фрагмент шахматного пакета плоскоовальных труб



Рисунок 3 – Экспериментальная установка

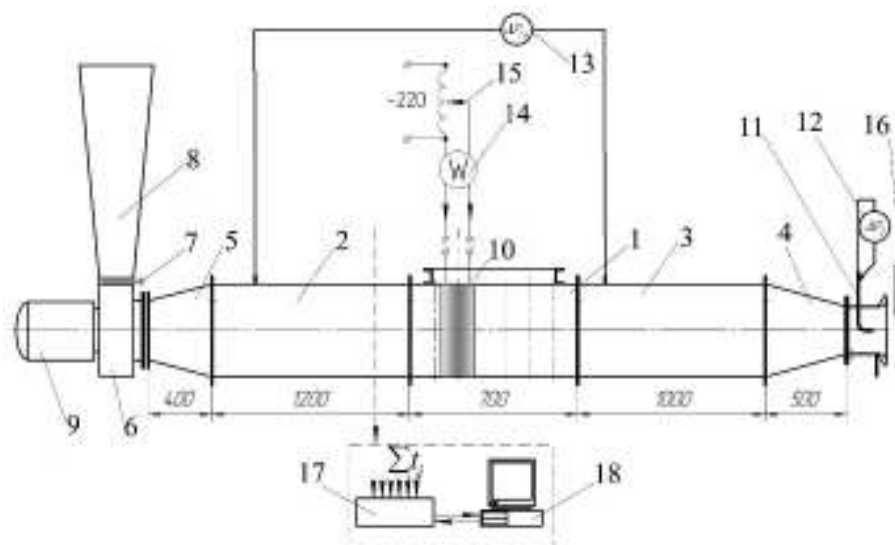


Рисунок 4 – Схема экспериментальной установки:

1 – рабочий участок; 2, 3 – успокоительный участок; 4 – диффузор; 5 – конфузор; 6 – вентилятор; 7 – шибер; 8 – раструб; 9 – электродвигатель; 10 – пакет из плоскоовальных труб; 11 – трубка Пито-Прандтля; 12, 13 – микроманометр; 14 – ваттметр; 15 – автотрансформатор; 16 – ртутный термометр; 17 – аналогово-цифровой преобразователь; 18 – компьютер

Геометрические характеристики шахматных пакетов задавались размерами полей отверстий в верхней и нижней трубных досках, изготовленных из древесно-волоконистых плит толщиной 3 мм. Для имитации бесконечности исследуемых пакетов в поперечном направлении на боковых стенках рабочего участка устанавливались полутрубки. В зависимости от величины поперечного шага между трубами S_1 количество их в одном поперечном ряду z_1 изменялось от $z_1 = 4$ ($S_1 = 42$ мм) до $z_1 = 7$ ($S_1 = 30$ мм). Количество поперечных рядов труб составляло 7 ($z_2 = 7$) для всех исследованных пакетов. Экспериментальные трубки длиной $l = 140$ мм имели одинаковые поперечные размеры труб $d_1 = 15$ мм. Продольный размер труб d_2 для труб типа 1 составлял 30 мм ($d_2/d_1 = 2$), труб типа 2 – $d_2 = 37,5$ мм ($d_2/d_1 = 2,5$), труб типа 3 – $d_2 = 51$ мм ($d_2/d_1 = 3,4$), труб типа 4 – $d_2 = 75$ мм ($d_2/d_1 = 5$) [11].

Исследования теплообмена проводились методом локального теплового моделирования, который осуществлялся электрообогревом только одной трубы пакета, называемой трубой-калориметром (рис. 5). Труба-калориметр устанавливалась в пятом поперечном ряду семирядного пакета и изготовлена из дюралюминия марки Д 16. Для измерения температурного поля стенки плоскооальной трубы вокруг ее периметра в среднем по высоте сечении, в трубе-калориметре выфрезерованы продольные канавки, в которые запаковывались от 7 до 15 (в зависимости от продольного размера труб) медь-константановых термопар толщиной проводов 0,1 мм. Провода термопар выводились к верхнему торцу трубы и подсоединялись к штекерному разъему.

Нагревание труб-калориметров для четырех типов труб осуществлялось с помощью электронагревателей. Нагреватели представляли собой плоскооальный керамический стержень, на который с очень малым шагом наматывался нихромовый провод диаметром 0,35 мм. Кольцевой зазор между стержнем нагревателя и стенкой трубы засыпался мелкодисперсным порошком окиси алюминия, имеющего довольно высокую для диэлектрика теплопроводность.

В процессе проведения экспериментов определялись средние конвективные коэффициенты теплообмена по формуле (3) непосредственно по результатам измерения температурного поля стенки трубы

$$\alpha_k = Q / H_k (\bar{T}_w - \bar{T}_f), \quad (3)$$

где H_k – внешняя площадь поверхности калориметра, которая рассчитывалась по формуле

$$H_k = [\pi \cdot d_1 + 2 \cdot (d_2 - d_1)] \cdot l_k, \quad (4)$$

где \bar{T}_w – средняя температура стенки трубы-калориметра определялась из соотношения

$$\bar{T}_w = \sum T_{w_i} / n, \quad (5)$$

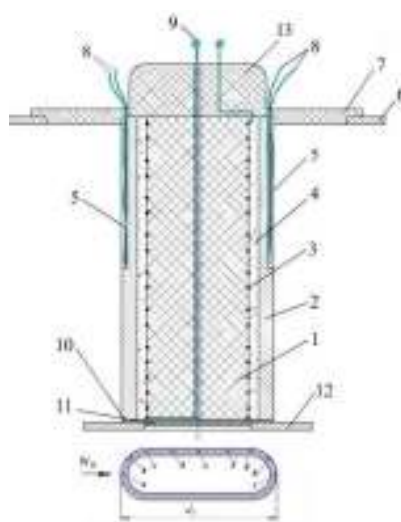


Рисунок 5 – Труба-калориметр:

1 – стержень нагревателя; 2 – плоскооальная труба; 3 – нихромовый провод; 4 – порошок окиси алюминия; 5 – канавки для термопар; 6 – верхняя трубная доска; 7 – крышка калориметра; 8 – провода

термопар; 9 – разъем нагревателя; 10 – теплоизолирующая прокладка; 11 – дистанционирующая шайба; 12 – нижняя трубная доска; 13 – теплоизолирующий ящик
(a, b, c, d, e, f, g, h, i - места установки термопар)

где \overline{T}_f – средняя температура потока воздуха определялась балансовым методом по выражению

$$\overline{T}_f = T_{in} + Q / (2G \cdot c_p), \quad (6)$$

в котором T_{in} – температура воздуха на входе в аэродинамическую трубу; Q – тепловыделение трубы-калориметра; G – расход воздуха; c_p – удельная теплоемкость воздуха ($c_p = 1005$ кДж/(кг·К)).

Физические константы: коэффициент теплопроводности и коэффициент кинематической вязкости воздуха, входящие в выражение для чисел Nu и Re, относились к среднебалансовой температуре воздуха. В качестве определяющей скорости принималась скорость потока в самом узком сечении пакета [12].

В целом экспериментами охвачено 49 шахматных пакетов труб, геометрические характеристики которых приведены в публикации [11]. Исследования проводились при варьировании как поперечного шага между трубами S_1 так и продольного S_2 и выполнены в области изменения чисел Рейнольдса Re_{d1} от $2 \cdot 10^3$ до $30 \cdot 10^3$.

Результаты исследований свидетельствуют о том, что зависимость чисел Нуссельта Nu от чисел Рейнольдса Re_{d1} описывается степенной функцией вида (7) и в полном объеме представлены в графическом и табличном виде в публикации [11].

$$Nu_{d1} = C_q \cdot Re_{d1}^m. \quad (7)$$

Анализ экспериментальных данных и их обобщение. При обработке и анализе экспериментальных данных и зависимостей чисел Нуссельта от чисел Рейнольдса большое внимание уделялось геометрическим факторам, влияющим на интенсивность теплообмена. В работах [11, 12] показано, что такими факторами являются шаговые характеристики пакетов, относительное удлинение профиля труб d_2/d_1 и параметр размещения труб в пакете (отношение поперечного шага между трубами к продольному S_1/S_2).

На рис. 6 представлены данные зависимостей чисел Нуссельта от параметра размещения S_1/S_2 . При увеличении параметра S_1/S_2 от 0,4 до 1,4 прослеживается возрастание интенсивности теплообмена на (10-25)%. Значения чисел Нуссельта группируются по параметру относительного удлинения профиля d_2/d_1 . То есть, теплообмен шахматных пакетов плоскоовальных труб зависит, как от геометрии исследуемых труб d_2/d_1 , так и от параметров их размещения S_1/S_2 . В пределах одного типа труб ($d_2/d_1 = \text{const}$) увеличение интенсивности теплообмена составляет (8-12) %.

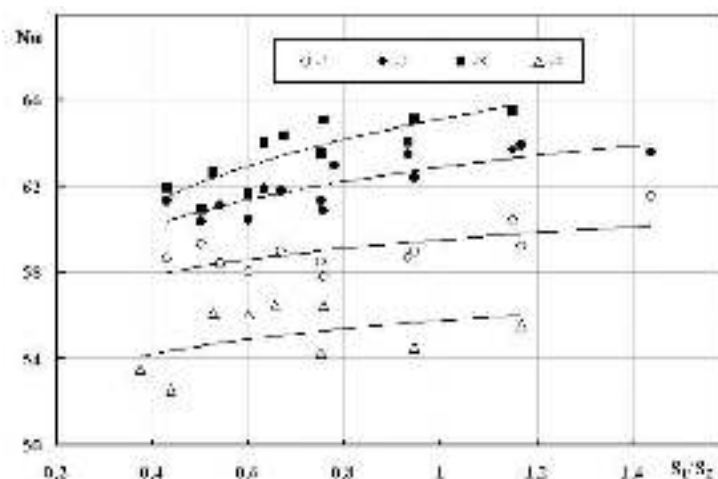


Рисунок 6 – Зависимость $Nu = f(S_1/S_2)$ при $Re_{d1} = 10^4$:
1 – $d_2/d_1 = 2,0$; 2 – $d_2/d_1 = 2,5$; 3 – $d_2/d_1 = 3,4$; 4 – $d_2/d_1 = 5,0$

На рис. 7 представлены экспериментальные данные зависимости чисел Нуссельта для пакетов плоскоовальных труб с разным отношением удлинения профиля d_2/d_1 при различных значениях параметра

S_1/S_2 , отнесенные к расчетным данным соответствующих по шагам пакетов круглых труб, имеющих одинаковое с плоскоовальными трубами миделевое сечение труб [13].

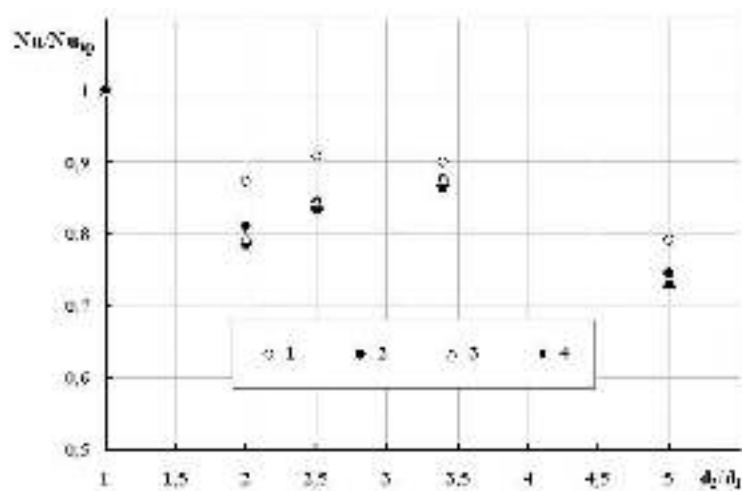


Рисунок 7 – Зависимость $Nu/Nu_{кр} = f(d_2/d_1)$ при $Re_{d1} = 10^4$:
 1 – $S_1/S_2 = 0,43$; 2 – $S_1/S_2 = 0,75$; 3 – $S_1/S_2 = 0,95$; 4 – $S_1/S_2 = 1,16$.

Анализ представленных данных свидетельствует о том, что зависимости $Nu/Nu_{кр} = f(d_2/d_1)$ являются неоднозначными: на интервале $1,0 < d_2/d_1 < 2,0$ относительная интенсивность теплообмена уменьшается, на интервале $2,0 < d_2/d_1 < 3,0$ – возрастает, а на интервале $d_2/d_1 > 3,0$ – снова уменьшается. Снижение значения $Nu/Nu_{кр}$ на первом интервале объясняется увеличением, по мере возрастания отношения d_2/d_1 , части поверхности цилиндра, которая находится в области обратных течений, образовавшихся в результате отрыва потока от передней части цилиндра, характеризующиеся относительно низкими локальными скоростями [11]. Переход к возрастанию интенсивности теплообмена на следующем интервале d_2/d_1 связан с тем, что при увеличении степени вытянутости профиля происходит присоединение потока, оторвавшегося от передней части профиля, к плоским боковым поверхностям цилиндра и ростом в пределах $d_2/d_1 = 2,0-3,0$ зоны этого присоединения [11]. Таким образом, для профилей, которые характеризуются значениями $d_2/d_1 > 2,0$, в отличие от картины обтекания круглого ($d_2/d_1 = 1,0$) и близких к нему ($d_2/d_1 < 2,0$) плоскоовальных цилиндров, имеет место два вида отрыва потока – в лобовой и кормовой их частях. При $d_2/d_1 > 3,0$ характер изменения интенсивности теплоотдачи в значительной степени обусловлен развитием течения на боковых плоских частях профиля: с увеличением их размеров, соответственно растет толщина пограничного слоя на них при фиксированных размерах зоны присоединения за первым отрывом, что в итоге диктует тенденцию падения величины $Nu/Nu_{кр}$ при увеличении степени вытянутости профиля d_2/d_1 .

Анализ экспериментальных данных показал изменение значений показателя степени m при числе Рейнольдса в уравнении (7), как в пределах отдельного типа пакетов с постоянной геометрией труб $d_2/d_1 = \text{const}$ (рис. 8), так и для пакетов с одинаковыми параметрами размещения S_1/S_2 при $d_2/d_1 = \text{var}$ (рис. 9).

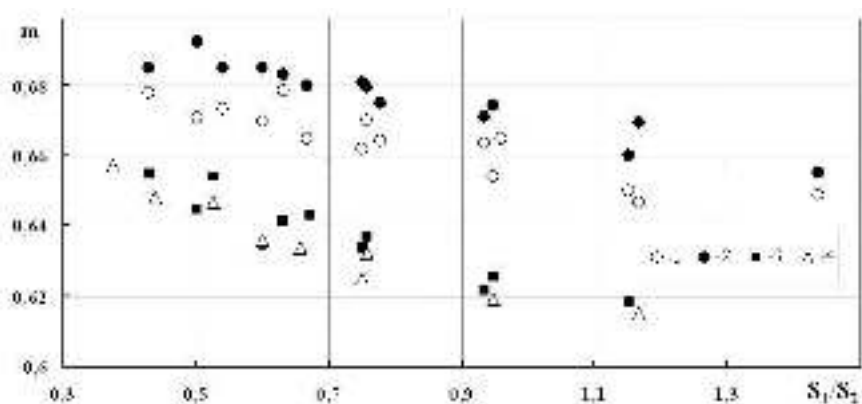


Рисунок 8 – Зависимость показателя степени m от параметра размещения S_1/S_2 :
 1 – $d_2/d_1 = 2,0$; 2 – $d_2/d_1 = 2,5$; 3 – $d_2/d_1 = 3,4$; 4 – $d_2/d_1 = 5,0$

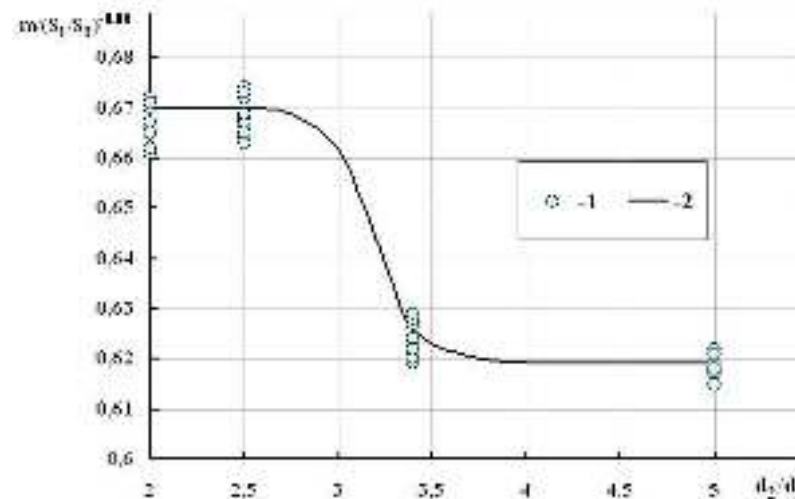


Рисунок 9 – Зависимость комплекса $m/(S_1/S_2)^{-0,06}$ от d_2/d_1 :
1 – экспериментальные данные; 2 – расчетная кривая

Варьирование геометрических характеристик пакетов в широком диапазоне позволило определить, что зависимость $m = f(S_1/S_2, d_2/d_1)$ при $d_2/d_1 = \text{const}$ для шахматных пакетов плоскоовальных труб может быть описана степенной функцией с постоянным значением показателя степени равным (-0,06) (рис. 8), а зависимость показателя степени m от относительного удлинения профиля d_2/d_1 представляет собой гиперболический тангенс (рис. 9). Увеличение значения параметров размещения S_1/S_2 и относительного удлинения профиля d_2/d_1 при прочих равных условиях сопровождается уменьшением значений показателя степени m , который в охваченных измерениями диапазонах геометрических и режимных характеристик изменялся от $m = 0,615$ до $m = 0,692$. Этот факт объясняется тем, что увеличение геометрических параметров d_2/d_1 и S_1/S_2 происходит, как за счет увеличения длины профиля труб, так и уменьшения продольных и увеличения поперечных размеров между трубами. В итоге, при $d_2/d_1 \rightarrow \infty$ и $S_1/S_2 \rightarrow \infty$ пакет труб вырождается в систему невзаимодействующих между собой продольных сплошных пластин. При этом, роль турбулентности, которая генерируется при отрывах потока в передней и задней частях плоскоовальных труб [14], постепенно нивелируется в результате вырождения этих явлений и приводит к уменьшению показателя степени m .

Учитывая сказанное выше, кривые $m = f(S_1/S_2, d_2/d_1)$ можно описать следующей функцией

$$m = \{a_1 \cdot \text{th}[k_1 \cdot (b_1 - d_2/d_1)] + m_0\} \cdot (S_1/S_2)^C, \quad (8)$$

где $a_1 = 0,026$, $b_1 = 3,2$ и $m_0 = 0,645$ – координата точки перегиба кривой (рис. 9) для пакетов труб всех типов. Значения показателя степени C при параметре размещения S_1/S_2 составляет величину (-0,06).

С учетом величин всех коэффициентов, зависимость для расчета значений показателя степени m приобретает вид

$$m = [0,026 \cdot \text{th}[k_1 (3,2 - d_2/d_1)] + 0,645] \cdot (S_1/S_2)^{-0,06}. \quad (9)$$

Аналогичный анализ для опытных значений коэффициента C_q соотношения (7) в зависимости от S_1/S_2 и d_2/d_1 показал, что экспериментальные значения C_q аппроксимируются качественно схожей с (8) функцией, но с противоположным перед гиперболическим тангенсом знаком (10). Коэффициент корреляции между гиперболическими функциями зависимостей (9) и (10) составляет (-1):

$$C_q = [-0,036 \cdot \text{th}[k_1 (3,2 - d_2/d_1)] + 0,164] \cdot (S_1/S_2)^{0,4}. \quad (10)$$

В соотношениях (9) и (10) k_1 и k_2 – эмпирические коэффициенты.

Таким образом, для расчета конвективного теплообмена глубинных рядов шахматных пакетов плоскоовальных труб при значениях относительной длины профиля $d_2/d_1 = (2,0 \dots 5,0)$ и параметра размещения $S_1/S_2 = (0,375 \dots 1,44)$ в области чисел Рейнольдса $Re_{d_1} = (2 \cdot 10^3 \dots 30 \cdot 10^3)$ предлагаются зависимости (7), (9) и (10).

Оценка точности обобщающих формул (7), (9), (10) осуществлялась сопоставлением опытных Nu_o и расчетных $Nu_{пр}$ значений чисел Нуссельта при граничных значениях чисел Рейнольдса $Re_{d1} = 2 \cdot 10^3$ и $Re_{d1} = 30 \cdot 10^3$ по формуле (11)

$$\Delta = [(Nu_o / Nu_p) - 1] \cdot 100\% \quad (11)$$

Результаты этой оценки, выполненной на основе массива экспериментальных данных для 49 исследованных пакетов показали, что расхождение Δ между опытными и расчетными значениями чисел Нуссельта не превышает $\pm 10\%$. В этой области находится 96 % точек.

Выводы

По результатам анализа и обобщения опытных данных по теплообмену шахматных пакетов плоскоовальных труб в диапазоне изменения чисел Рейнольдса Re_{d1} от $2 \cdot 10^3$ до $30 \cdot 10^3$, относительного удлинения профиля труб d_2/d_1 от 2 до 5,0, параметра размещения труб S_1/S_2 от 0,4 до 1,45 можно сделать следующие выводы:

- интенсивность теплообмена шахматных пакетов плоскоовальных труб зависит от геометрии труб и при варьировании удлинения профиля в пределах d_2/d_1 от 2 до 5 изменяется на (10-25) %, а при варьировании шаговых характеристик труб при $d_2/d_1 = \text{const}$ - на (8-12)%;
- показатель степени m и коэффициент C_q в формуле (7) зависят, как от геометрических характеристик труб, так и шаговых характеристик пакетов;
- предложены новые соотношения для расчетов коэффициентов теплообмена шахматных пакетов плоскоовальных труб, учитывающие влияние на теплообмен геометрических характеристик плоскоовальных труб и пакетов, и могут быть использованы при расчете теплообмена воздухоподогревателей котельных агрегатов, регенераторов газотурбинных установок.

Список использованной литературы

1. Антуфьев В.М., Белецкий Г.С. Теплопередача и аэродинамические сопротивления трубчатых поверхностей в поперечном потоке. М.-Л.: Машгиз, 1948. 119 с.
2. Кэйс В.М., Лондон А.Л. Компактные теплообменники. М.: Энергия, 1967. 224 с.
3. Антуфьев В.М. Эффективность различных форм конвективных поверхностей нагрева. М.-Л.: Энергия, 1966. 184 с.
4. Ala Ali Hasan. Thermal-hydraulic performance of oval tubes in a cross-flow of air. Heat and Mass Transfer, accepted for publication. THP 2004 by author and THP 2004 Springer-Verlag. By permission. P. 1-32.
5. Руденко О.И., Терех О.М., Туз В.О., Рогачов В.А., Кондратюк В.А. Оцінка теплоаеродинамічної ефективності поодиноких труб різного поперечного перерізу. Науковий журнал „ScienceRise”. 2015. № 2/2 (7). С. 7-11.
6. Benarji N., Balaji C., Venkateshan S.P. Unsteady fluid flow and heat transfer over a bank of flat tubes. Heat Mass Transfer. 2008. No 44. P. 445-461.
7. Amer Jameel Shareef, Abdulmajeed A. Ramadhan Heat Transfer and Fluid Flow Characteristic in banks Flat Tubes. Tikrit Journal of Engineering. Sciences. 2011. Vol.18. No.4. P. 88-103.
8. Ishak M., Tahseen A. Tahseen, Md. Mustafizur Rahman. Experimental investigation on heat transfer and pressure drop characteristics of air flow over a staggered flat tube bank in crossflow. International Journal of Automotive and Mechanical Engineering. 2013. V. 7. P. 900-911.
9. Жукаускас А. А. Конвективный перенос в теплообменниках. М.: Наука. 1982. 472 с.
10. Tahseen Ahmad, Rahman M.M., Ishak M. An experimental study of air flow and heat transfer over in-line flat tube bank. International Journal of Automotive and Mechanical Engineering. 2014. V. 9. P. 1487-1500.
11. Кондратюк В.А., Терех О.М., Баранюк О.В., Письменный С.М. Теплообмін шахових пакетів плоскоовальних труб в поперечному потоці. Восточно-европейский журнал передовых технологий. 2015. №1/8 (73). С. 43-48.
12. Письменный Е.Н., Кондратюк В.А., Жукова Ю.В., Терех А.М. Конвективный теплообмен поперечно-омываемых шахматных пакетов плоскоовальных труб. Восточно-европейский журнал передовых технологий. 2011. №2/8 (50). С. 4-8.
13. Тепловой расчет котельных агрегатов: нормативный метод / под ред. Н. В. Кузнецова. М.: Энергия, 1973. 296 с.
14. Терех О.М., Семеняко О.В., Туз В.О., Кондратюк В.А. Обтікання поодиноких циліндрів в поперечному потоці. Восточно-европейский журнал передовых технологий. 2013. №2/8 (62). С. 23-26.

A. Terekh, Ph.D., senior Researcher, ORCID 0000-0002-1320-8594
A. Baranyuk, Ph.D., associate professor, ORCID 0000-0001-6008-6465
V. Kondratiuk, Ph.D., associate professor, ORCID 0000-0001-5035-311X
V. Rogachov, Ph.D., associate professor, ORCID 0000-0001-5489-874X
A. Rudenko, Ph.D., associate professor, ORCID 0000-0002-8541-9710
National technical university of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

HEAT TRANSFER OF FLAT-OVAL TUBE BUNDLES IN CROSS FLOW

The goal of this work was to create generalized relationships for calculating the convective heat transfer coefficients of staggered bundles of flat oval tubes based on the obtained experimental data for recuperative heat exchangers of the “gas-gas” type in a wide range of changes in the geometric characteristics of tubes, bundles and flow regime parameters. An analysis of the known literature data by the authors shows that no systematic studies of the influence of geometric and step characteristics of tubes on heat transfer and aerodynamic drag of flat-oval tube bundles during transverse air flow in a wide range of Reynolds numbers were carried out. The results of numerical modeling are not experimentally confirmed. The published works contain fragmentary data, which are usually of a private character. Presented experimental studies of convective heat transfer of staggered bundles of flat oval tubes with transverse air flow around them were carried out in the range of Reynolds numbers $2000 < Re_{d1} < 30000$ with a variation in the relative elongation of the profile of the flat oval tube d_2 / d_1 from 2 to 5, and the ratio of the transverse tube pitch to the longitudinal S_1 / S_2 ranged from 0,4 to 1,45. The influence of geometric and operational parameters on the heat transfer of bundles is established. The heat transfer rate of staggered bundles of flat-oval tubes when varying the elongation of the tubes profile d_2 / d_1 in the range from 2 to 5 changes by (10-25) %, and when varying the step characteristics of the tubes at $d_2 / d_1 = \text{const}$ by (8-12) %. Evaluation of the accuracy of the generalizing formulas, which was carried out on the basis of an array of experimental data for the 49 studied bundles, indicates that the difference between the experimental and calculated values of the Nusselt numbers does not exceed $\pm 10\%$. Design relationships are proposed for determining the heat transfer coefficients of staggered bundles of flat-oval tubes, taking into account the influence of the operating parameters on the heat transfer, the geometric characteristics of flat-oval tubes and bundles and can be used in calculating the heat transfer of air heaters of boiler units, gas turbine plant regenerators.

Keywords: heat transfer, investigations, flat-oval tube, staggered bundle, calculation, generalized correlations.

References

1. Antuf'ev, V. M., Beletskyi, G. S. (1948). Heat transfer and aerodynamic drags of tube surfaces in crossflow. Moscow, USSR: Mashgiz, 119.
2. Kase, W. M., London, A. L. (1967). Compact heat exchangers. Moscow, USSR: Energy, 224.
3. Antuf'ev, V. M. (1966). Efficiency of different forms of heating convective surfaces. Moscow, USSR: Energy, 184.
4. Ala Ali Hasan. (2004). Thermal-hydraulic performance of oval tubes in a cross-flow of air. Heat and Mass Transfer, accepted for publication. THP 2004 by author and THP 2004 Springer-Verlag. By permission, 1-32.
5. Rudenko, A., Terekh, A., Tuz, V., Rogachov, V., Kondratiuk, V. (2015). Estimation of thermal aerodynamic efficiency of single tubes with different cross-section. Scientific Journal „ScienceRise”, No 2/2 (7), 7-11. DOI: 10.15587/2313-8416.2015.37446.
6. Benarji, N., Balaji, C., Venkateshan, S. P. (2008). Unsteady fluid flow and heat transfer over a bank of flat tubes. Heat Mass Transfer, 44, 445-461. DOI: 10.1007/s00231-007-0256-5.
7. Amer Jameel Shareef, Abdulmajeed A. Ramadhan. (2011). Heat Transfer and Fluid Flow Characteristic in banks Flat Tubes. Tikrit Journal of Engineering, Sciences, Vol. 18, (4), 88-103.
8. Ishak, M., Tahseen, Tahseen A., Rahman, Md. Mustafizur. (2013). Experimental investigation on heat transfer and pressure drop characteristics of air flow over a staggered flat tube bank in crossflow. International Journal of Automotive and Mechanical Engineering, V. 7, 900-911. DOI: <http://dx.doi.org/10.15282/ijame.7.2012.7.0073>.
9. Zhukauskas, A. (1982). A convective transfer in heat exchangers. Moscow, USSR: Science, 472.
10. Tahseen, Tahseen Ahmad, Rahman, M. M., Ishak, M. (2014). An experimental study of air flow and heat transfer over in-line flat tube bank. International Journal of Automotive and Mechanical Engineering, V. 9, 1487-1500. DOI: <http://dx.doi.org/10.15282/ijame.9.2014.1.0123>.
11. Kondratiuk, V. A., Terekh, A. M., Baranyuk, A. V., Pis'mennyi, E. N. (2015). Heat transfer of staggered bundles of flat oval tube in transversal flow. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1/8 (73), 43-48. DOI: 10.15587/1729-4061.2015.37318.

12. Pis'menyi, E.N., Kondratyuk, V.A., Zhukova, Y.V., Terekh, A. M. (2011). Heat transfer of staggered bundles of flat-oval tubes in cross flow. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2/8 (50), 4-8.

13. Thermal calculation of boiler plants (standard method) (1973). Ed. 2, edited by N. V. Kuznetsov. Moscow, USSR: Energy, 296.

14. Terekh, A. M., Semenyako, A.V., Tuz, V. E., Kondratyuk, V. A. (2013). Flowing around single cylinders in transversal flow. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2/8 (62), 23-26.

УДК 536.24:533.6.011

О. М. Терех, к.т.н., с. н. с., **ORCID** 0000-0002-1320-8594

О. В. Баранюк, к.т.н., доц., **ORCID** 0000-0001-6008-6465

Кондратюк В. А. к.т.н., доц., **ORCID** 0000-0001-5035-311X

В. А. Рогачов, к.т.н., доц., **ORCID** 0000-0001-5489-874X

А. І. Руденко, к.т.н., доц., **ORCID** 0000-0002-8541-9710

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»**

ТЕПЛООБМІН ПОПЕРЕЧНО-ОМИВАНИХ ПАКЕТІВ ПЛОСКООВАЛЬНИХ ТРУБ

Виконані експериментальні дослідження конвективного теплообміну шахових пакетів плоскоовальних труб при поперечному їх омиванні повітряним потоком в діапазоні змінення чисел Рейнольдса $2000 < Re_{d1} < 30000$ при варіюванні відносного подовження профілю плоскоовальної труби d_2/d_1 від 2 до 5, а відношення поперечного кроку труб до подовжнього S_1/S_2 варіювалось від 0,4 до 1,45. Встановлено вплив геометричних і режимних параметрів на теплообмін пакетів. Інтенсивність теплообміну шахових пакетів плоскоовальних труб при варіюванні відносного подовження профілю труб d_2/d_1 в межах від 2 до 5 змінюється на (10-25)%, а при варіюванні крокових характеристик труб при $d_2/d_1 = const$ на (8-12)%. Запропоновані розрахункові співвідношення для визначення коефіцієнтів теплообміну шахових пакетів плоскоовальних труб, що враховують вплив на теплообмін режимних параметрів, геометричних характеристик труб та пакетів і які можуть бути використані в розрахунках теплообміну повітропідігрівачів котельних агрегатів, регенераторів газотурбінних установок.

Ключові слова: теплообмін, дослідження, плоскоовальна труба, шаховий пакет, розрахунок, узагальнені залежності.

Надійшла 15.05.2019

Received 15.05.2019

УДК 62.768+62.747+62.744

М.К. Безродний, д-р техн. наук, проф., **ORCID** 0000-0002-3500-5165

О.О. Майстренко, магістрант, **ORCID** 0000-0003-1961-7548

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

ЕФЕКТИВНІСТЬ ТЕПЛОАСОСНО-АДСОРБЦІЙНОЇ СИСТЕМИ КОНСЕРВУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

В роботі представлена розробка теплоасосно-адсорбційної системи для осушення повітря, яке використовують для довгострокового консервування енергетичного обладнання. Розроблено теоретичну модель для подальшого числового дослідження роботи системи. Виконано числовий аналіз термодинамічної ефективності, досліджено зміну параметрів повітря у вузлових точках системи, проаналізовано вплив зміни температури та відносної вологості оточуючого повітря, а також температура
© М.К. Безродний, О.О. Майстренко, 2019

тури регенераційного повітря на роботу системи. Отримано графічні залежності ефективності роботи системи при зміні параметрів зовнішнього повітря і температури регенераційного повітря після конденсатора теплового насосу. Отримані результати свідчать, що застосування даної системи дозволяє суттєво зменшити питомі витрати електричної енергії на осушення робочого повітря в порівнянні з базовою системою без використання теплового насосу за будь-яких значень параметрів зовнішнього повітря.

Ключові слова: захист металевих обладнань від корозії, консервування енергетичного обладнання, осушення повітря, адсорбційний осушувач, тепловий насос.

Вступ

Захист металевих конструкцій від корозії - актуальна проблема сучасної енергетики. Більшість аварійних ситуацій та фінансових витрат при експлуатації енергетичного обладнання спричинені саме дією корозії, оскільки обладнання експлуатується при високих температурах та значних надлишкових тисках. Будь-яка частина обладнання, яка піддалась дії корозії є потенційною причиною виходу з ладу усєї установки.

В сучасних умовах енергетичне обладнання працює в маневровому режимі і має тривалі періоди простою. Саме в цей час необхідно зберегти обладнання від дії стоячої корозії, як найбільш небезпечного її прояву. При відсутності заходів зі збереження обладнання термін його експлуатації знижується та зростають фінансові витрати на ремонтні роботи і амортизаційні відрахування [1].

Волога повітря є основним каталізатором процесу корозії, при цьому чим вище відносна вологість повітря, тим швидше руйнування металевих частин обладнання [2]. Але за низької відносної вологості повітря (нижче 40%) процеси корозії майже зупиняються і не руйнують метал, тому для якісного збереження енергетичного обладнання необхідно підтримувати відносну вологість повітря, яке контактує з металом, на рівні нижче 40 % [3].

Існує багато способів осушення повітря, які мають різноманітну фізику процесу. До основних методів осушення повітря відносяться: конденсаційний, адсорбційний, абсорбційний та мембранний способи [4].

Конденсаційний спосіб заснований на охолодженні повітря з подальшим видаленням вологи. Реалізується даний метод, зазвичай, з використанням теплового насосу. Для видалення вологи повітря пропускають спочатку через випарник теплового насосу, де повітря охолоджується та частково осушується, далі повітря пропускається через конденсатор, де нагрівається і паралельно з чим зменшується відносна вологість повітря. Даний метод має два суттєвих недоліки - надзвичайно складно досягти відносної вологості робочого повітря на рівні нижче 35-50% та неможливість осушення повітря з відносною вологістю нижче 35%. Перевагою даного методу є невисоке споживання електричної енергії на осушення повітря за відносної вологості повітря в 60 % та вище.

Адсорбційний метод заснований на властивості твердих сорбентів поглинати вологу з повітря. Існує два основних різновиди: осушення стисненого повітря при проходженні через товщу силікагелю та осушення повітря за атмосферного тиску при проходженні через адсорбційний ротор. Перший спосіб заснований на властивості деяких адсорбентів поглинати вологу зі стиснутого повітря та віддавати поглинуту вологу повітрю при більш низькому тиску. Для реалізації даного методу створюють спеціальне обладнання, яке має дві ємності з адсорбентом. Повітря, яке осушується, проходить через одну ємність, а частина від даного повітря розширюється та направляється в іншу ємність, де регенерує адсорбент. За рахунок попереминого руху повітря через ємності досягається безперервне осушення стиснутого повітря. Даний спосіб осушення повітря має вузьке застосування - осушення стиснутого повітря. Для осушення великої кількості повітря, яке необхідне за атмосферного тиску, даний метод не підходить через значні витрати електричної енергії на стиснення повітря.

Другий різновид адсорбційного осушення заснований на властивості силікагелю віддавати поглинуту вологу підігрітому регенераційному повітрю. В даному способі силікагель сформований у ротор, який обертається. Даний ротор розділений на два сектори. Через $\frac{3}{4}$ частини перерізу ротора проходить повітря, яке осушується і підігрівається, а через $\frac{1}{4}$ проходить підігріте регенераційне повітря, яке зволожується та охолоджується. При цьому процес осушення повітря безперервний. Даний спосіб дозволяє отримати повітряну суміш з температурою точки роси до -40°C , тобто може забезпечити глибоке осушення повітря. Але існує і один недолік - високі витрати електричної енергії на підігрів регенераційного повітря.

Також існує абсорбційний метод осушення повітря. Даний спосіб заснований на властивості концентрованого розчину поглинати вологу з повітря. Для реалізації даного методу створюють обладнання з двома зрошувальними камерами. В першій камері концентрований розчин контактує з повітрям, яке осушується, при цьому поглинається волога з повітря. Далі розчин направляється у другу зрошувальну камеру, де продувається гарячим регенераційним повітрям і випаровується. Після упарювання розчин охолоджується та направляється у першу зрошувальну камеру і цикл повторюється. Процес осушення повітря відбувається безперервно. Даний спосіб має високі витрати теплоти на

регенерування розчину, значні габаритні розміри, і основне – пов'язаний з використанням агресивних водних розчинів, що є небезпечними для людини та металу. Також надзвичайно складно забезпечити глибоке осушення повітря за рахунок абсорбування вологи.

Мембранна технологія осушення повітря заснована на властивості мембран селективно пропускати молекули вологи, при цьому не пропускати повітря. Дана технологія реалізується за рахунок проходження стиснутого повітря через спеціальний пристрій, в якому потік вологого повітря розділяється на осушене повітря та паро-повітряну суміш, яка видаляється. Недоліком даного способу є великі витрати електричної енергії на стиснення повітря і подальше його проходження через мембрани.

Для реалізації системи консервування енергетичного обладнання всі технології, які мають у своєму складі процес стиснення повітря, не підходять, оскільки затрати енергії на стиснення великих об'ємів повітря є значними. Інші методи, як видно із вищенаведеного аналізу, також мають суттєві недоліки, що обмежують області їх використання. Найбільш придатною для зазначеної мети є адсорбційна технологія осушення повітря (заснована на використанні силікагелевого ротора), оскільки не має більшості недоліків і дозволяє проектувати установки, які можуть забезпечити надзвичайно низьку відносну вологість (до температури точки роси в $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$). Разом з тим слід відмітити, що енергетична ефективність адсорбційних осушувачів досить низька внаслідок повної втрати теплоти зволоженого регенераційного повітря, що викидається в атмосферу. Саме даний чинник є основним стримуючим фактором до широкого використання адсорбційних осушувачів у технологіях консервування. Тому для забезпечення високої енергетичної ефективності адсорбційної технології осушення при одночасному забезпеченні низької вологості робочого повітря запропонована теплонасосно-адсорбційна система осушення, яка поєднує переваги адсорбційного осушувача та теплового насоса.

Мета роботи

Метою проведеної роботи є поєднання адсорбційного осушувача повітря з теплонасосною установкою для утилізації теплоти відпрацьованого регенераційного повітря після адсорбційного ротора з її подальшим використанням для підігріву свіжого регенераційного повітря. Дані дії викликані високими витратами електроенергії на підігрів регенераційного повітря в звичайних адсорбційних осушувачах, що в свою чергу збільшує фінансові витрати на виведення енергетичного обладнання в резерв.

Опис роботи схеми

Принцип роботи адсорбційного осушувача заснований на властивості силікагелю поглинати вологу з повітря при відносно низьких температурах ($-40\text{ }^{\circ}\text{C} \dots +40\text{ }^{\circ}\text{C}$), та віддавати адсорбовану вологу гарячому регенераційному повітрю ($+60\text{ }^{\circ}\text{C} \dots +150\text{ }^{\circ}\text{C}$). Для забезпечення безперервного процесу осушення робочого повітря та регенерування адсорбенту створюють спеціальний ротор (рис.1). Даний ротор має сотову структуру, що збільшує поверхню контакту і полегшує проходження повітря через об'єм силікагелю. Ротор поділений на дві зони, із співвідношення 1 до 4, через більшу зону проходить робоче повітря, яке осушується і підігрівається, а через меншу зону - попередньо підігріте регенераційне повітря, яке випаровує вологу з ротора, зволожується та охолоджується.

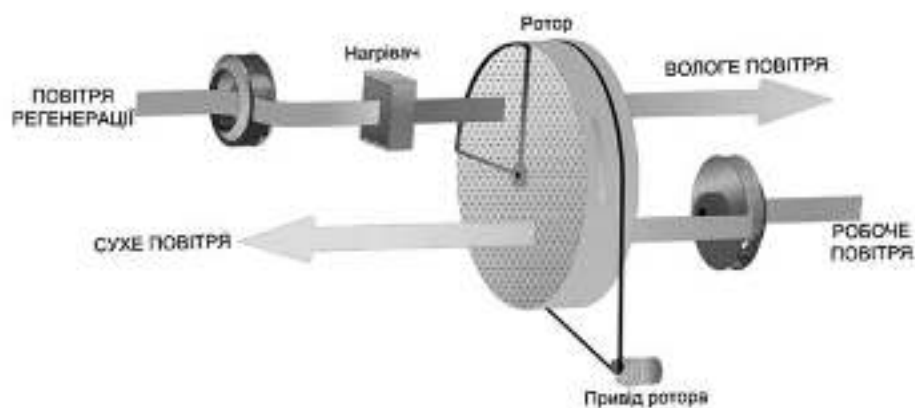


Рис. 1. Принцип роботи адсорбційного осушувача повітря.

На рис.2 представлена теплонасосно-адсорбційна схема консервування енергетичного обладнання.

В цій схемі для забезпечення глибокого осушення повітря, як консервуючого агента, використовується силікагелевий адсорбційний ротор, а для підігріву і високоєфективного регенерування

теплоти регенераційного повітря застосовано тепловий насос, з частковою рециркуляцією регенераційного повітря, що суттєво зменшує споживання енергії в порівнянні з електричним нагрівом.

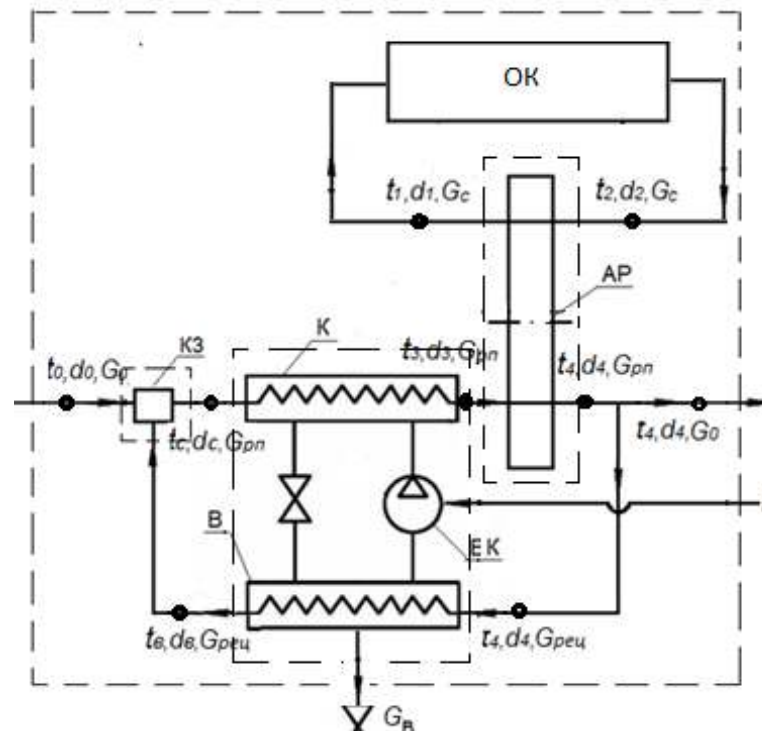


Рис. 2. Принципова теплонасосно-адсорбційна схема осушування повітря в системі консервування металевих обладнання: *K* – конденсатор ТН; *B* – випарник ТН; *EK* – компресор; *AP* – адсорбційний ротор; *K3* – камера змішування; *OK* – об’єкт консервування.

Принцип роботи схеми полягає в наступному. В верхній частині рисунка показаний об’єкт консервування (ОК), із якого вологе (робоче) повітря подається в адсорбційний ротор, підігрівається, осушується і з температурою t_1 та вологовмістом d_1 знову надходить в ОК. В нижній частині рисунка наведена схема підготовки, подачі в ротор і відведення з нього регенераційного повітря. При цьому зовнішнє повітря (0) з температурою t_0 , вологовмістом d_0 і масовою витратою G_0 забирається із зовнішнього середовища та подається в камеру змішування, де змішується з рециркуляційним регенераційним повітрям (6), яке надходить після випарника теплового насоса з температурою t_b , вологовмістом d_b і масовою витратою G_b . Після змішування повітряна суміш (7) подається в конденсатор теплового насоса, де підігрівається до температури t_3 (3) і подається в ротор для його регенерації і видалення адсорбованої вологи. При проходженні через ротор регенераційне повітря охолоджується та зволожується. Після ротора регенераційне повітря (4) з температурою t_4 та вологовмістом d_4 розділяється на два потоки, один з яких викидається в оточуюче середовище (8), а інший через випарник теплового насоса (5), де охолоджується і частково осушується, подається в камеру змішування, де змішується зі свіжим повітрям.

Термодинамічний аналіз ефективності схеми

Термодинамічний аналіз ефективності схеми може бути виконаний на основі попереднього аналізу термодинамічного стану схеми регенерації адсорбційного ротора, що визначається параметрами схеми у її вузлових точках. Для даної схеми невідомими параметрами є температура та вологість регенераційного повітря після випарника на вході в камеру змішування, на виході з камери змішування, на виході з адсорбційного ротора або на вході в випарник ТН, а також витрата атмосферного повітря та витрата рециркуляційного повітря, що надходить на випарник. Відповідні залежності для цих параметрів можуть бути визначені з рівнянь теплового та матеріального балансів як окремих елементів схеми, так і схеми в цілому.

Враховуючи ізоентальпійний характер процесу випаровування вологи в роторі, тобто рівність ентальпій $h_3=h_4$, загальний тепловий баланс теплонасосно-адсорбційної схеми осушування повітря (нехтуючи ентальпією конденсату після випарника ТН) можна записати у вигляді

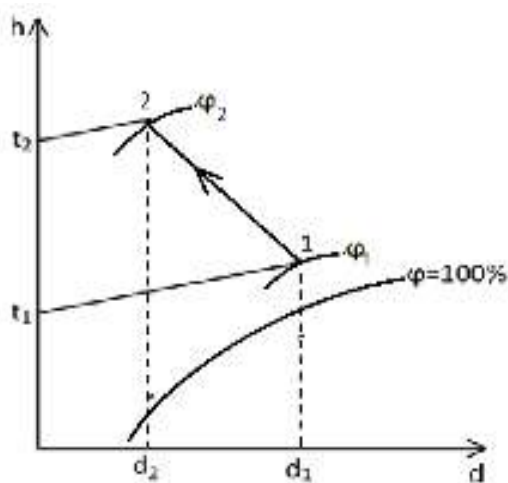


Рисунок 3. Процес осушення робочого повітря при проходженні через адсорбційний ротор.

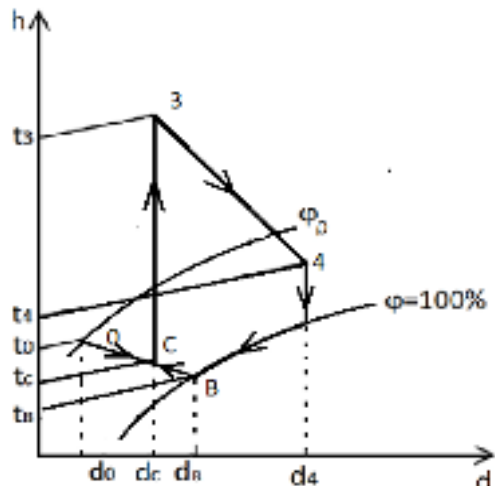


Рисунок 4. Процес підготовки та зміни стану регенераційного повітря при проходженні через адсорбційний ротор та ТН.

На рисунках 3 і 4 представлені робочі процеси осушення робочого та зміни стану регенераційного повітря в елементах теплонасосно-адсорбційної установки в $h-d$ діаграмі вологого повітря.

$$Q_0 + L_k = Q_{ck}, \quad (1)$$

де Q_0 - тепловий потік, що підводиться в систему зі свіжим повітрям, кВт;

L_k - потужність приводу компресора теплового насоса, кВт;

Q_{ck} - тепловий потік, що відводиться в навколишнє середовище з викидним повітрям, кВт, або більш детально у вигляді

$$G_0 h_0 + \frac{Q_{вип}}{\varphi - 1} = G_0 h_4, \quad (2)$$

де $Q_{вип}$ - тепловий потік, що відводиться від рециркуляційного повітря у випарнику, кВт;

G_0 - витрата свіжого повітря, кг с.п./год;

h_4 - ентальпія регенераційного повітря після адсорбційного ротора, кДж/кг с.п.;

h_0 - ентальпія свіжого повітря, кДж/кг с.п.;

φ - коефіцієнт трансформації ТН.

Дійсний коефіцієнт трансформації теплоти теплового насоса визначається як:

$$\Phi = \Phi_T \eta_{ТН}, \quad (3)$$

де $\eta_{ТН}$ - коефіцієнт втрат, який враховує реальні процеси, що здійснюються робочим тілом у ТН, який згідно з рядом джерел може змінюватись в діапазоні 0,6...0,8 (приймаємо $\eta_{ТН} = 0,6$);

Φ_T - теоретичний коефіцієнт трансформації ТН.

Коефіцієнт трансформації теплоти ідеального циклу Карно φ_T з урахуванням теплових необоротностей у випарнику та конденсаторі ТН визначається за співвідношенням

$$\Phi_T = \frac{1}{1 - \frac{T_B^{ТН}}{T_K^{ТН}}} = \frac{1}{1 - \frac{273 + t_B - \Delta t_B}{273 + t_K + \Delta t_K}}, \quad (4)$$

де $T_B^{ТН}$ - абсолютна температура випаровування холодильного агента у випарнику ТН, К;

$T_K^{ТН}$ - абсолютна температура конденсації холодильного агента в конденсаторі ТН, К;

t_B - температура відпрацьованого повітря на виході з випарника ТН, °С;

t_K - температура повітря на виході з конденсатора ТН, °С;

Δt_B - температурний перепад між потоками відпрацьованого повітря й холодильного агента на виході з випарника ТН, °С;

Δt_K - температурний перепад між потоками холодильного агента і регенеративного повітря на виході з конденсатора ТН, °С.

У літературі наводяться числові значення температурних перепадів у конденсаторі і випарнику ТН. Для ТН типу «повітря – повітря» для випарника і конденсатора згідно з [5] можна прийняти $\Delta t_B = \Delta t_K = 10^\circ\text{C}$.

З урахуванням виразу для теплового потоку випарника ТН

$$Q_{\text{вип}} = G_{\text{рец}} (h_4 - h_6) \quad (5)$$

та рівняння матеріального балансу сухого повітря камери змішування

$$G_0 + G_{\text{рец}} = G_{\text{pn}}, \quad (6)$$

де h_6 – ентальпія рециркуляційного повітря після випарника, кДж/кг с.п.,
 $G_{\text{рец}}$ – витрата рециркуляційного потоку повітря, кг с.п./год,
 G_{pn} – витрата регенеративного потоку повітря, кг с.п./год,
 рівняння (2) після перетворень можна записати у вигляді

$$K \frac{h_4 - h_6}{\varphi - 1} = (1 - K)(h_4 - h_0), \quad (7)$$

де K – коефіцієнт рециркуляції регенеративного повітря $K = G_{\text{рец}} / G_{\text{pn}}$.

Тоді, із рівняння (7) отримуємо вираз для коефіцієнта рециркуляції регенераційного повітря

$$K = \frac{1}{\frac{(h_4 - h_6)}{(\varphi - 1)(h_4 - h_0)} + 1}. \quad (8)$$

Інші параметри системи визначимо із матеріального і теплового балансів окремих елементів схеми. При цьому з рівняння теплового балансу ТН

$$Q_{\text{вип}} + L_k = Q_{\text{конд}}, \quad (9)$$

яке можна представити у вигляді

$$G_{\text{рец}} (h_3 - h_6) + \frac{G_{\text{рец}} (h_3 - h_6)}{\varphi - 1} = G_{\text{pn}} (h_3 - h_c), \quad (10)$$

отримуємо формулу для ентальпії повітря на виході з випарника ТН

$$h_6 = h_3 - \frac{h_3 - h_c}{K} \frac{\varphi - 1}{\varphi}. \quad (11)$$

Ентальпію повітряної суміші після змішування рециркуляційного і свіжого повітря в камері змішування визначимо із рівняння теплового балансу камери змішування

$$G_o h_0 + G_{\text{rc}} h_6 = G_{\text{pn}} h_3, \quad (12)$$

звідки

$$h_c = (1 - K)h_0 + Kh_6. \quad (13)$$

Із матеріального балансу адсорбційного ротора

$$G_{\text{on}} (d_2 - d_1) = G_{\text{pn}} (d_4 - d_3), \quad (14)$$

де G_{on} – витрата повітря, яке осушується і є консервуючим агентом, кг с.п./год, а d_1, d_2, d_3, d_4 – вологовміст повітря у відповідних точках схеми, отримаємо вираз для вологовмісту скидного повітря

$$d_4 = d_3 + \frac{G_{\text{on}}}{G_{\text{pn}}} (d_2 - d_1). \quad (15)$$

Із рівняння матеріального балансу вологи для камери змішування

$$G_o d_0 + G_{\text{rc}} d_6 = G_{\text{pn}} d_3 \quad (16)$$

отримаємо вираз для вологовмісту повітря на виході з випарника ТН

$$d_6 = \frac{d_3 - (1 - K)d_0}{K}. \quad (17)$$

Знаючи d_e , температуру повітря на виході із випарника ТН можемо отримати із інтерполяційного рівняння на лінії насичення ($\varphi=100\%$) на діаграмі h-d вологого повітря [6]

$$t_e = 14,752 \ln(d_e) - 18,929. \quad (18)$$

Числова реалізація вищенаведеної системи рівнянь для параметрів повітря в вузлових точках системи дозволяє визначити енергетичну ефективність застосування теплового насоса в системі регенерації ротора звичайним відношенням корисного ефекту роботи схеми до затраченої енергії на привід компресора ТН

$$\eta = \frac{Q_{кор}}{L_{комп}}, \quad (19)$$

де η - коефіцієнт енергетичної ефективності схеми.

Визначаючи корисний ефект як тепловий потік, що використовується для випаровування вологи з адсорбційного ротора, за рівнянням

$$Q_{кор} = G_{рн} (d_4 - d_3) r(t), \quad (20)$$

де $r(t)$ - прихована теплота пароутворення води, а потужність приводу компресора ТН за рівнянням

$$L_{компр} = \frac{G_{реци} (h_4 - h_e)}{(\varphi - 1)}, \quad (21)$$

отримаємо кінцевий вираз для коефіцієнта енергетичної ефективності схеми у вигляді

$$\eta = \frac{(d_4 - d_3) r(t) (\varphi_T - 1)}{K (h_3 - h_e)}. \quad (22)$$

Розрахунковий аналіз системи

Числовий аналіз системи рівнянь із використанням співвідношень (3), (4), (8), (11), (13), (15), (17), (18) методом послідовних наближень дає змогу оцінити вплив зміни заданих величин (температури та відносної вологості зовнішнього повітря, зміни температури та вологовмісту регенераційного повітря перед адсорбційним ротором), на характеристики роботи окремих елементів (коефіцієнт рециркуляції відпрацьованого повітря, коефіцієнт трансформації ТН) і на енергетичну ефективність застосування теплонасосно-адсорбційної схеми консервування металевго обладнання.

При виборі d_3 (вологовмісту регенераційного повітря перед ротором) врахована така обставина. Відомо, що для видалення вологи з повітря шляхом його охолодження у випарнику теплового насоса необхідно суттєво переохолоджувати повітря, тому мінімальна величина вологовмісту прийнята у 5 г/кг с.п. З іншого боку для ефективного видалення вологи з адсорбційного ротора необхідно підтримувати якомога нижчий вологовміст повітря, і тому вводиться верхнє обмеження- 20 г/кг с.п. В зв'язку з цим обрана величина вологовмісту регенераційного повітря на рівні $d_3=10$ г/кг с.п., як найбільш близьке значення до нормальної вологості оточуючого повітря, що задовольняє всі вище згадані умови.

При виборі діапазону для температури регенераційного повітря виходили із обмеження, що звичайний тепловий насос може забезпечити максимальну температуру повітря після конденсатора в 70 °С. У той же час адсорбційний ротор вимагає підтримувати мінімальну температуру регенераційного повітря на рівні 60 °С. Тому у результатах розрахунків приведені дані для трьох значень температур на вході в ротор: +60°С, +65°С, +70°С.

Свіже повітря у даному випадку береться із робочого простору котельного цеху ТЕЦ, тому в розрахунках зміна температури цього повітря прийнята в діапазоні від 0 °С до 30 °С при відносній вологості 50 %.

Співвідношення потоків консервуючого повітря і регенеративного повітря взяті як 3 до 1. Дана обставина забезпечує рівномірний потік повітря по всій площині робочого ротора та оптимальні умови роботи теплонасосно-адсорбційної схеми консервування металевго обладнання.

На рис. 3 наведено графічні залежності вологовмісту повітря після випарника ТН від температури зовнішнього повітря і температури регенераційного повітря після конденсатора. Із даних результатів випливає, що вологовміст, а отже і температура повітря після випарника зменшуються зі збільшенням температури зовнішнього повітря та при зростанні температури після конденсатора. Це спричинене тим фактом, що вологовміст свіжого повітря з підвищенням його температури різко збільшується і тому для

забезпечення необхідного вологовмісту регенераційної суміші потрібно більше переохолоджувати рециркуляційне повітря.

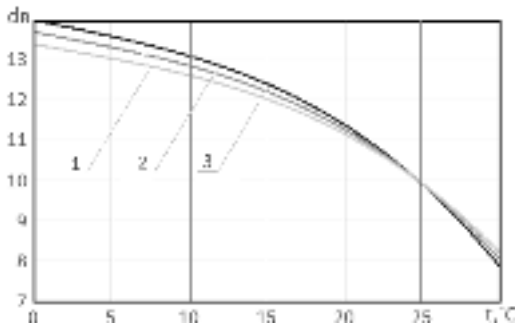


Рис.3. Залежність вологовмісту повітря після випарника, г/кг с.п., від температури свіжого повітря та температури регенераційного повітря після конденсатора конденсатора: 1- $t_k=60^\circ\text{C}$, 2- $t_k=65^\circ\text{C}$, 3- $t_k=70^\circ\text{C}$.

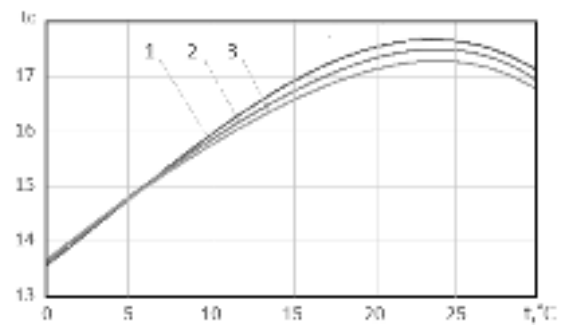


Рис.4. Залежність температури повітря після сумішоутворення, $^\circ\text{C}$, від температури свіжого повітря та температури регенераційного повітря після конденсатора: 1- $t_k=60^\circ\text{C}$, 2- $t_k=65^\circ\text{C}$, 3- $t_k=70^\circ\text{C}$.

Також, при зростанні температури свіжого повітря температура повітря після сумішоутворення зростає при температурах свіжого повітря до 25°C , а далі температура суміші спадає. Це обумовлено необхідністю більш різкого охолодження і осушення повітря в випарнику ТН для підтримання заданого вологовмісту суміші в умовах, коли вологовміст свіжого повітря перевищує заданий вологовміст регенераційного повітря $d_3 = \text{const}$ (див. Рис.4). що і спричиняє зниження температури повітря після змішування.

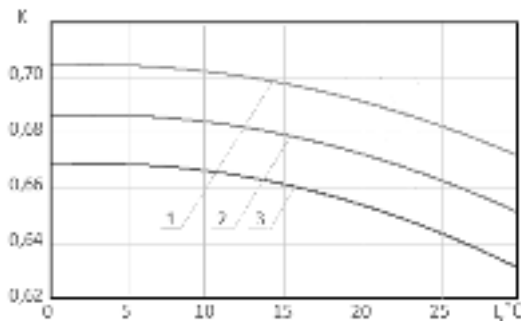


Рис.5. Залежність коефіцієнта рециркуляції від температури свіжого повітря та температури регенераційного повітря після конденсатора конденсатора: 1- $t_k=60^\circ\text{C}$, 2- $t_k=65^\circ\text{C}$, 3- $t_k=70^\circ\text{C}$.

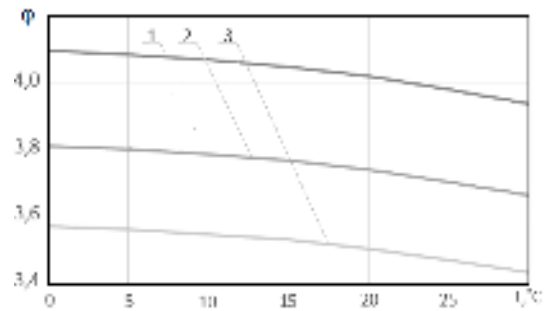


Рис.6. Залежність коефіцієнта трансформації ТН від температури свіжого повітря та температури регенераційного повітря після конденсатора: 1- $t_k=60^\circ\text{C}$, 2- $t_k=65^\circ\text{C}$, 3- $t_k=70^\circ\text{C}$.

На рис. 5 наведено графічні залежності коефіцієнта рециркуляції від температури зовнішнього повітря і температури регенераційного повітря після конденсатора. Із даних результатів випливає, що коефіцієнт рециркуляції зменшується при підвищенні температури свіжого повітря та збільшенні температури повітря після конденсатора. Це спричинене тим фактом, що вологовміст свіжого повітря з підвищенням його температури різко збільшується і тому, для забезпечення необхідного вологовмісту регенераційної суміші потрібно подавати меншу кількість рециркуляційного повітря з високим вологовмістом і більше його переохолоджувати в випарнику ТН. Це, в свою чергу, як і підвищення температури повітря після конденсатора ТН, погіршує умови роботи теплового насоса, що приводить до зменшення коефіцієнта трансформації (рис.6).

На рис.7 представлений графік залежності коефіцієнта енергетичної ефективності схеми від температури зовнішнього повітря та температури повітря на вході в адсорбційний ротор (після конденсатора ТН).

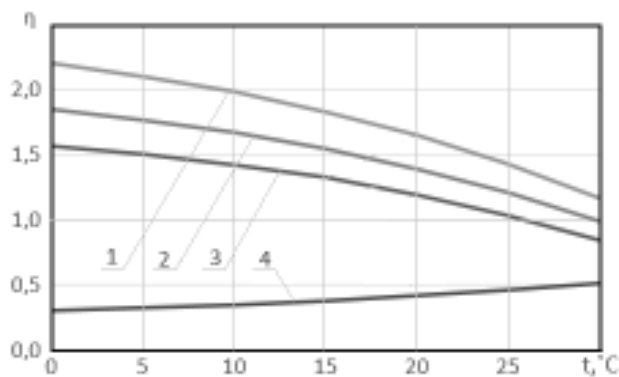


Рис.7. Залежність коефіцієнта енергетичної ефективності η від температури свіжого повітря та температури регенераційного повітря після конденсатора: 1- $t_k=60^\circ\text{C}$, 2- $t_k=65^\circ\text{C}$, 3- $t_k=70^\circ\text{C}$, 4- система без теплового насоса.

Із наведеного графіку видно, що енергетична ефективність застосування запропонованої схеми визначається умовами роботи теплового насоса і зростає в області невисоких температур зовнішнього (свіжого) повітря і помірних температур нагрітого регенераційного повітря. Видно також, що витрати електроенергії на осушення робочого повітря зменшуються від 2 до 7 разів в порівнянні з базовою схемою без теплового насоса.

Висновки

1. Комбіноване використання адсорбційного осушувача та теплового насоса є набагато енергоефективнішим рішенням ніж використання адсорбційного осушувача з електричним нагрівачем. Ця перевага досягається за рахунок використання теплоти вологого регенераційного повітря, яке надходить після ротора.

2. При значеннях температур регенераційного повітря 60°C - 70°C питомі затрати зовнішньої енергії у розробленій схемі менші у 2 - 7 разів, в порівнянні з базовою схемою без теплового насоса.

3. При використанні розробленої схеми особливістю є підвищена ефективність роботи при низьких температурах зовнішнього повітря, що сприяє ефективному використанню даного обладнання в помірній кліматичній зоні.

Список використаної літератури

1. Майстренко О. О. Консервування енергетичного обладнання методом продувки сухим повітрям / Майстренко О. О., Безродний М. К., Шаповал Б. А. // *Енергетика та електрифікація*-2018.- №4 -С. 3–5.
2. Чинні галузеві нормативні документи з експлуатації та ремонту Електростанцій та мереж [Електронний ресурс].– Режим доступу до ресурсу: https://ua.energy/wp-content/uploads/2018/01/GID-34.01.101-2009_2018_01_01_web.pdf.
3. Старцев В. И. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО КОНСЕРВАЦИИ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ / Старцев В. И., Кострыкина Е. Ю., Модестова Т. Д. // Москва: СПО ОРГРЭС-1997.
4. Хмельнюк М. Г. Современные технологии осушения воздуха / Хмельнюк М. Г., Ваджинский Д. И., Жихарева Н. В. // *Холодильна техніка та технологія*-2014. - №3- С.15-21.
5. Морозюк Т. В. Теория холодильных машин и тепловых насосов / Т. В. Морозюк.// Одесса: Студия «Негоциант»- 2000. – 712 с.
6. Безродный М.К. Эффективность применения тепловых насосов в установках сушки древесины./ Безродный М.К., Кутра Д.С. // Киев: «Політехніка»- 2011. – 240 с.

M. Bezrodny, Dr. Sc. Sciences., Rrof. **ORCID** 0000-0002-3500-5165

O. Maistrenko, Master **ORCID** 0000-0003-1961-7548

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

EFFICIENCY OF HEAT PUMP AND ADSORPTION SYSTEM OF CONSERVATION OF ENERGY EQUIPMENT

The paper presents the development of heat pump and adsorption system conservation metal equipment. This system is intended for air drying which is used for long-term conservation of power equipment on the plant station. The processes corrosion of metal details are slowed down when the relative humidity is less than 40%, so

this system is designed to provide deep air dehumidification at low electricity costs. A theoretical model of this system is developed in the article and presented calculation of this system. A mathematical model for numerical study of the system operation is developed. The numerical analysis of thermodynamic efficiency was performed, the change of the air mixture parameters at the main points of the system was investigated, the influence of the change of temperature and the relative humidity of the surrounding air on the system operation was analyzed and shows some conclusions. The limits of real-world usage of this system are also analyzed and presented where can be used this system and her benefits. The results obtained show that the application of this system allows to significantly reduce the specific consumption of electric energy for drying the working air compared to the base system without the use of a heat pump for any values of the ambient air parameters. This conclusion presented that use heat pump decrease energy consumption without deterioration of the process of air dehumidification. The graphical dependences of the system performance on a wide range of operating temperatures and humidity of the outside air were obtained. Also, graphical dependences of the heat pump energy conversion factor and air parameters at the main points of the system over a wide range of operating air parameters are presented and analyzed.

Key words: protection of metal equipment from corrosion, canning of power equipment, air drainage, adsorption dehumidifier, heat pump.

References

1. O.O. Maisrenko, Konservuvannya energetichnoho obladnannya metodon produvki syhum povitryam / O.O. Maisrenko, M.K. Bezrodny, B.A. Shapoval // Energetika I elektrifikaciya-2018.-#4.-S.3-5.
2. Chinni haluzevi normativni dokumentu z ekspluatacii ta remontu Elektrostancii ta mrezh [Elektronnyj resurs].- Rezhym dostupu: https://ua.energy/wp-content/uploads/2018/01/GID-34.01.101-2009_2018_01_01_web.pdf.
3. V.I. Stercev, METODICHESKIE UKAZANIYA PO KONSERVVACII TEPLOENERGETICHESKOHO OBORUDOVANIYA / V.I. Starcev, E.U. Kostrukina, T.D. Modestova // Moskva: SPO ORHRES-1997.
4. M.H. Hmelnyuk, Sovremennue tehnologii osusheniya vozduha / M.H. Hmelnyuk, D.I. Vaddzinskiy, N.V. Zihaleva // Hololilna tehnika ta tehnolohiyz-2014.-#3.-S.15-21.
5. T.V. Morozuk, Teoriya holodilnih mashin I teplovih nasosov / T.V. Morozuk // Odessa: Studiia "Nehociant"-2000.-712 s.
6. M.K. Bezrodny, Effektivnost primeneniya teplovih nasosov v ustanovkah sushki drevesinu / M.K. Bezrodny, D.S. Kutra // Kiev: 'Politehnika'-2011.-240 s.

Надійшла 17.06.2019

Received 17.06.2019

МОНІТОРИНГ, ДІАГНОСТИКА ТА КЕРУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ ТА ОБЛАДНАННЯМ MONITORING, DIAGNOSTICS AND MANAGEMENT OF ENERGY PROCESSES AND EQUIPMENT

M. Abdulhamid
AL-Hikma University, Iraq
O. Billy
University of Nairobi, Kenya

STUDY OF DISTRIBUTED SLACK BUS MODEL FOR ECONOMIC DISPATCH OF RENEWABLE ENERGY

Abstract: In this paper, a distributed slack bus (DSB) using combined participation factors based on scheduled generation capacities of the system is designed in order to distribute the system losses among the generators. A DSB algorithm is developed and implemented using a Newton Raphson (NR) solver on a MATLAB platform. The IEEE 14 bus is used as a case study. Renewable energy (RE) sources are introduced into the system and the generation cost compared between systems with renewable energy sources and those with only thermal generators in both the single slack bus (SSB) model and the DSB model. The DSB employed resulted in a reduction in overall real power generation from 272.593 MW to 272.409 MW in the 14 bus model and cost of generation also decreased in both buses. Real power line losses also reduced in the buses. The change in the generation levels of the voltage controlled buses resulted in a proper economic dispatch scheme which gave an accurate representation of the network parameters. The cost of generation is considerably reduced upon introduction of wind and solar generators into the system as compared to systems without these sources. An even more accurate network model is obtained by using combined participation factors.

Keywords: Distributed slack bus; renewable energy

1. Introduction

Economic dispatch is the process of ensuring that the total load is appropriately shared the generating units operating in parallel in a power system. It uses two notions as its basis, the first is that the generating units must provide for the load requirements of the power system within the minimum cost bracket by optimally using the units. The second is that the generating units must be able to provide back up if other units fail. However, this is constrained within a margin [1].

The slack bus is the bus that provides additional real and reactive power to supply the transmission losses in a power system. It is also taken as the reference where the magnitude and phase angle are taken. It is the reference bus for voltage measurements [1].

The use of a distributed slack bus is a technique of removing the concentrated burden of the slack bus by distributing losses to each generator bus in the power system. This results in the system generators adjusting their outputs appropriately subject to their operational limits in order to achieve economic operation. The model was designed to remedy the inadequacies of the single slack bus model which does not exist in actual power systems. This has been motivated by the increase in distributed generation, deregulation and liberalization of the power generation sector [1].

Renewable energy is energy that utilizes sources that are continually replenished by nature to produce usable forms of energy. Examples of these sources include, the sun, wind, water, the earth's heat and plants. This study is interested in two types of renewable energy: wind and solar.

Wind energy is really just another form of solar energy. Sunlight falling on oceans and continents causes air to warm and rise, which in turn generates surface winds. The wind has been used by humans for thousands of years, first to carry ships across oceans and, later, to pump water and grind grain. More recently, wind has been harnessed as a clean, safe source of electricity [1].

Solar energy being in abundance almost all over the country is justifiably seen as the ultimate resource to tap. Although mainly supplemental in nature, it also addresses the problems of atmospheric pollution and climate change [1].

2. Design methodology

2.1 Formation of the improved Newton Raphson matrix

The DSB model selected involves the implementation of a participation factor based on real power generation at generator buses. The selected participation factor implemented using a NR solver results in a change in the conventional NR matrix [2]. The changes made include designating the slack bus as a generator bus and including it in the Jacobian and introducing a participation factor in the Jacobian matrix [3]. This results in the formation of a matrix known as the extended Jacobian (J_e). The Jacobian matrix loses its symmetry and its new size is given by: $(2n-m) \times (2n-m-1)$. Where n is the total number of buses in the system and m represents the number of generator buses. A real power loss term (P_{Loss}) which is multiplied by the participation factors in also included in the corrections matrix. The total real power (P_i) injection in the system thus changes and is given by:

$$P_i = \sum_{k=1}^n |V_i| |V_k| |Y_{ik}| \cos(\theta_{ik} + \delta_k - \delta_i) + K_i(i) * P_{Loss} \tag{1}$$

Where V_i is the voltage at the i th bus, V_k is the voltage at the k th bus, Y_i is the admittance, δ is the voltage angle, and K_i is participating factor.

The reactive power (Q_i) equation remains similar to the single slack bus model since it does not depend on the selected participation factor and is given by:

$$Q_i = - \sum_{k=1}^n |V_i| |V_k| |Y_{ik}| \sin(\theta_{ik} + \delta_k - \delta_i) \tag{2}$$

The ordinary NR matrix thus changes as shown below.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \vdots \\ \Delta P_n \\ \Delta Q_1 \\ \vdots \\ \Delta Q_{n-m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial P_1}{\partial \delta_1}\right) & \dots & \left(\frac{\partial P_1}{\partial \delta_n}\right) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{\partial P_n}{\partial \delta_1}\right) & \dots & \left(\frac{\partial P_n}{\partial \delta_n}\right) \\ \left(\frac{\partial Q_1}{\partial \delta_1}\right) & \dots & \left(\frac{\partial Q_1}{\partial \delta_n}\right) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{\partial Q_{n-m}}{\partial \delta_1}\right) & \dots & \left(\frac{\partial Q_{n-m}}{\partial \delta_n}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial P_1}{\partial |V_1|}\right) & \dots & \left(\frac{\partial P_1}{\partial |V_{n-m}|}\right) & K_i \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \left(\frac{\partial P_n}{\partial |V_1|}\right) & \dots & \left(\frac{\partial P_n}{\partial |V_{n-m}|}\right) & K_n \\ \left(\frac{\partial Q_1}{\partial |V_1|}\right) & \dots & \left(\frac{\partial Q_1}{\partial |V_{n-m}|}\right) & \frac{\partial Q_1}{\partial P_{Loss}} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \left(\frac{\partial Q_{n-m}}{\partial |V_1|}\right) & \dots & \left(\frac{\partial Q_{n-m}}{\partial |V_{n-m}|}\right) & \frac{\partial Q_1}{\partial P_{Loss}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_1 \\ \vdots \\ \Delta \delta_n \\ \Delta |V_1| \\ \vdots \\ \Delta |V_{n-m}| \\ \Delta P_{Loss} \end{bmatrix} \tag{3}$$

Since the participation factor selected depends only on real powers, some terms in the extended Jacobian matrix above are removed.

For real power in the generator buses, $\frac{\partial P_i}{\partial P_{Loss}} = K_i$, which represents our participation factors. For the load buses, $\frac{\partial P_i}{\partial P_{Loss}} = 0$. The reactive powers are not included in the participation factors. The resulting extended Jacobian matrix is thus reduced as shown below.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \vdots \\ \Delta P_n \\ \Delta Q_1 \\ \vdots \\ \Delta Q_{n-m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial P_1}{\partial \delta_1}\right) & \dots & \left(\frac{\partial P_1}{\partial \delta_n}\right) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{\partial P_n}{\partial \delta_1}\right) & \dots & \left(\frac{\partial P_n}{\partial \delta_n}\right) \\ \left(\frac{\partial Q_1}{\partial \delta_1}\right) & \dots & \left(\frac{\partial Q_1}{\partial \delta_n}\right) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{\partial Q_{n-m}}{\partial \delta_1}\right) & \dots & \left(\frac{\partial Q_{n-m}}{\partial \delta_n}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial P_1}{\partial |V_1|}\right) & \dots & \left(\frac{\partial P_1}{\partial |V_{n-m}|}\right) & K_i \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \left(\frac{\partial P_n}{\partial |V_1|}\right) & \dots & \left(\frac{\partial P_n}{\partial |V_{n-m}|}\right) & 0 \\ \left(\frac{\partial Q_1}{\partial |V_1|}\right) & \dots & \left(\frac{\partial Q_1}{\partial |V_{n-m}|}\right) & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \left(\frac{\partial Q_{n-m}}{\partial |V_1|}\right) & \dots & \left(\frac{\partial Q_{n-m}}{\partial |V_{n-m}|}\right) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_1 \\ \vdots \\ \Delta \delta_n \\ \Delta |V_1| \\ \vdots \\ \Delta |V_{n-m}| \\ \Delta P_{Loss} \end{bmatrix} \tag{4}$$

2.2 Formulation of Fuel Cost Functions

For thermal generator, it is required to minimize the fuel cost with real power output. This can be done below.

The fuel cost function of each fossil fuel fired generator is expressed as a quadratic function. The total fuel cost in terms of real power output can be expressed as:

$$C(P_{gi}) = \sum_{i=1}^{NG} (a_i P_{gi}^2 + b_i P_{gi} + c_i) \tag{5}$$

Where a_i , b_i and c_i are the fuel cost coefficients of i th unit, NG is the number of generators, and P_{gi} is generator active or real power.

The minimization of fuel cost with reactive power output can also be done. Reactive power production cost is highly dependent on real power output. If a generator produces its maximum active power (P_{max}) then no reactive power is produced. Therefore apparent power equals P_{max} , and reactive power production by a generation will result in reduction of its active power production.

To generator reactive power Q_{gi} by a generator I , it is required to reduce its active power to P_{gi} . Therefore, at the different values of Q_{gi} with respect to P_{gi} , the quadratic cost expression for reactive power is calculated by fitting a curve into a quadratic polynomial. The fuel cost in term of reactive power output can be expressed as:

$$C(Q_{gi}) = \sum_{i=1}^{NG} (a_{gi} Q_{gi}^2 + b_{gi} + c_{gi}) \quad (6)$$

Where a_{gi} , b_{gi} , c_{gi} are reactive power cost coefficients, calculated using a curve fitting, and NG is number of generators.

Furthermore, the operating cost function of the wind farm can be obtained. According to [4], the linear cost function assumed for the wind farm is given as follows:

$$C_{wi}(W_i) = d_i \cdot W_i \quad (7)$$

Where d_i is direct cost coefficient of i th wind farm, and W_i is actual wind power.

For cost junction due to the over-generation, the penalty cost caused by not using all the available wind power is related to the difference between the available wind power and the actual wind power used. The mathematical model is written as follows [4].

$$C_{pwi}(W_{iav} - W_i) = K_{pi}(W_{iav} - W_i) = K_{pi}\{(W - W_i)f_w(W)\} \quad (8)$$

Where K_{pi} is penalty cost coefficient for over generation of i th wind farm, $f_w(w)$ is probability density function (PDF) of wind power output, and W_{iav} is available wind power

For cost function due to the under generation, the cost function of i th wind farm for calling the reservists cover i th wind farm due to under-generation is written as follows [4]

$$C_{rwi}(W_i - W_{iav}) = K_{ri}(W_i - W_{iav}) = K_{ri}\{(W - W_i) f_w(W)\} \quad (9)$$

Where K_{ri} is reserve cost coefficient for under generation of i th wind farm.

Therefore, the overall cost functions for the wind farm is:

$$C_{wi}(W_i) + C_{pwi}(W_{iav} - W_i) + C_{rwi}(W_i - W_{iav}) \quad (10)$$

2.2.1 Constraints

The total real power generation by each generating unit must balance the predicted real power demand plus the real power losses

$$\sum_{i=1}^{NG} P_{gi} - \sum_{i=1}^{NB} P_{oi} - P_L = 0 \quad (11)$$

Where P_{oi} is active power demand on the i th bus, NB is number of buses, and P_L is real power losses.

Similarly, for reactive power

$$\sum_{i=1}^{NG} Q_{gi} - \sum_{i=1}^{NB} Q_{oi} - Q_L = 0 \quad (12)$$

Where Q_{oi} is reactive power demand on the i th bus, NB is number of buses, NG is number of generators, and Q_L is reactive losses.

Active and reactive power operating limit (generation capacity limits) is given by

$$P_{gi}^{min} \leq P_{gi} \leq P_{gi}^{max} \quad (i=1, 2 \dots NG) \quad (13)$$

Where P_{gi}^{min} and P_{gi}^{max} are the minimum and maximum limits for active power generation by i th unit.

The power balance constraints to be satisfied for thermal and wind energy are [5]:

Real power balance constraints

$$\sum_{i=1}^{NG} P_{gi} + \sum_{i=1}^{NW} P_{wi} - \sum_{i=1}^{NB} P_{Di} - \sum P_L = 0 \quad (14)$$

And

Reactive power balance constraints

$$\sum_{i=1}^{NG} Q_{gi} + \sum_{i=1}^{NW} Q_{wi} - \sum_{i=1}^{NB} Q_{Di} - \sum Q_L = 0 \quad (15)$$

Where P_{Di} and Q_{Di} are active and reactive power drawn, while, P_{wi} , and Q_{wi} are the active and reactive wind power.

2.3 Algorithm

This section discusses the solution algorithm for real and reactive power participation factors. The real power participation factors developed in [3] for the general distributed generator and the reactive power distributed slack model for the NR method is developed in [6] to distribute the reactive slack. The NR method is selected for the distributed slack bus model because, as compared to the Gauss Siedel method (GS), NR has the following merits:

1. Its rate of convergence is fast and therefore requires less number of iterations to obtain the solution.
2. It is independent of the number of buses of the system hence it can be applied on large practical systems.
3. The convergence of the method is not affected by the selection of the slack bus; hence there is freedom of distributing the slack bus.
4. It is more accurate and reliable when used for large systems.

However, the feature that automatically disqualifies the GS and Fast Decoupled method as a method to be used in the power flow analysis of the DSB model is the fact that all the other methods are sensitive to the position of the slack bus. NR method is not sensitive to the position of the slack bus and is therefore an ideal choice for power flow for the DSB model

2.3.1 Distributed slack bus algorithm based on real power participation factors

The distributed slack bus selected based on a real power generator output participation factors is implemented using a NR solver. The selected algorithm is illustrated below.

Step 1: Read system data and formulate Y_{bus}

Step 2: Initialize bus voltage magnitudes $|V_i|$, phase angles δ and set initial $P_{Loss} = 0$

Step 3: Set iteration counter $K = 0$ and convergence criteria ϵ

Step 4: Set initial values of P_{gi} and determine initial participation factor K_i^0

Step 5: Compute $P_i^{(k)}$ and $Q_i^{(k)}$ for system buses using the equations:

$$P_i = \sum_{k=1}^n |V_i| |V_k| |Y_{ik}| \cos(\theta_{ik} + \delta_k - \delta_i) + K_i * P_{Loss}$$

$$Q_i = - \sum_{k=1}^n |V_i| |V_k| |Y_{ik}| \sin(\theta_{ik} + \delta_k - \delta_i)$$

Step 6: Compute residuals $\Delta P_i^{(k)}$ and $\Delta Q_i^{(k)}$

Step 7: Compute largest of absolute residues of P_i and Q_i between two successive iterations:

- If residue $< \epsilon$: STOP

- If not, Compute elements of the extended Jacobian (Je) where $Je = \frac{dF}{dx}$ for each iteration.

Step 8: Solve for $Je^{(k)} \Delta X^{(k)} = -F^{(k)}$

Step 9: Update values of V_i , δ_i and P_{Loss} for the next iteration i.e. $x^{(k+1)} = x^{(k)} + \Delta X^{(k)}$

Step 10: Let $K = K+1$

Step 11: Check real and reactive limits of the participating generators. If it violates the limits, we change it into a constant PQ injection, increment the counter and go to step 4.

Step 12: If generator limits are not violated, we then calculate the participation factor K_i and go to step 5.

2.3.2 Distributed slack bus algorithm based on reactive power participation factors

The distributed slack bus selected based on a real power generator output participation factors is implemented using a NR solver by as shown above. This paper develops a distributed slack bus algorithm based on reactive power participation factors as follows:

Step 1: Read system data and formulate Y_{bus}

Step 2: Initialize bus voltage magnitudes $|V_i|$, phase angles δ and set initial $Q_{Loss} = 0$

Step 3: Set iteration counter $K = 0$ and convergence criteria ϵ

Step 4: Set initial values of Q_{gi} and determine initial reactive power participation factor K_i^0

Step 5: Compute $P_i^{(k)}$ and $Q_i^{(k)}$ for system buses using the equations:

$$P_i = \sum_{k=1}^n |V_i| |V_k| |Y_{ik}| \cos(\theta_{ik} + \delta_k - \delta_i)$$

$$Q_i = -\sum_{k=1}^n |V_i| |V_k| |Y_{ik}| \sin(\theta_{ik} + \delta_k - \delta_i) + K_t * P_{Loss}$$

Step 6: Compute residuals $\Delta P_i^{(k)}$ and $\Delta Q_i^{(k)}$

Step 7: Compute largest of absolute residues of P_i and Q_i between two successive iterations:

- If residue $< \epsilon$: STOP

- If not, Compute elements of the extended Jacobian (Je) where $Je = \frac{dF}{dx}$

for each iteration

Step 8: Solve for $Je^{(k)} \Delta X^{(k)} = -F^{(k)}$

Step 9: Update values of V_i , δ_i and Q_{Loss} for the next iteration i.e. $x^{(k+1)} = x^{(k)} + \Delta X^{(k)}$

Step 10: Let $K = K+1$

Step 11: Check real and reactive limits of the participating generators. If it violates the limits, we change it into a constant PQ injection, increment the counter and go to step 4.

Step 12: If generator limits are not violated, we then calculate the participation factor K_t and go to step 5.

2.4 Flow Charts

Fig.1 shows Flow chart of the distributed slack bus algorithm

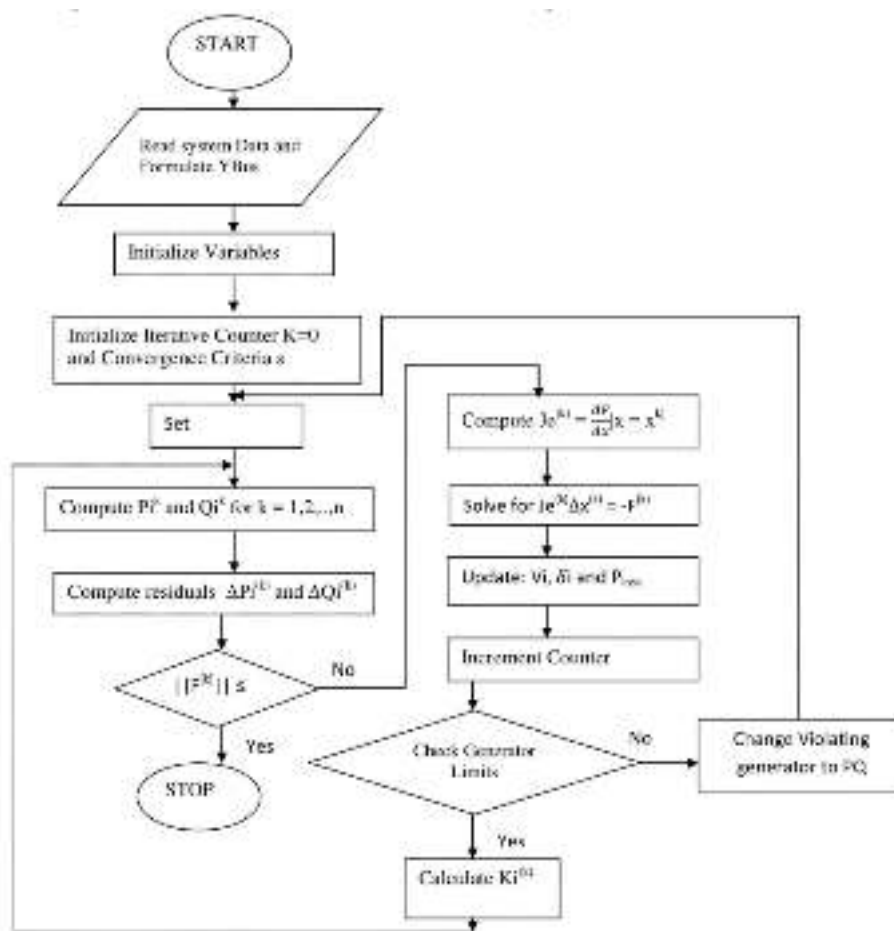


Fig.1 Flow chart of the distributed slack bus

3. Results and analysis

3.1 Case study

3.1.1 IEEE 14 Bus Test Network

A one line diagram for the test network is shown Fig.2.

For the distributed slack bus, bus 1 is considered as a PV bus. Table 1 shows bus data for IEEE 14 bus test network, while Table 2 and Table 3 show line data for IEEE 14 bus test network, and cost coefficients for IEEE 14 bus respectively.

Table 1 Bus data for IEEE 14 bus test network

Bus	Type	Specific voltage	Angle δ	Real Power Gen (MW)	Reactive Power Gen (MVAR)	Load P1 (MW)	Load Q1 (MVAR)	Qmin	Qmax
1	SLACK	1.06	0	232.4	-16.9	0	0	0	0
2	PV	1.045	0	40	42.4	21.7	12.7	-40	50
3	PV	1.01	0	0	23.4	94.2	19.0	0	0
4	PQ	1.0	0	0	0	47.8	-3.9	0	0
5	PQ	1.0	0	0	0	7.6	1.6	0	0
6	PV	1.07	0	0	12.2	11.2	7.5	-6	24
7	PQ	1.0	0	0	0	0	0	0	0
8	PV	1.09	0	0	17.4	0	0	-6	24
9	PQ	1.0	0	0	0	29.5	16.0	0	0
10	PQ	1.0	0	0	0	0	3.8	0	0
11	PQ	1.0	0	0	0	3.5	1.8	0	0
12	PQ	1.0	0	0	0	6.1	1.6	0	0
13	PQ	1.0	0	0	0	13.5	5.8	0	0
14	PQ	1.0	0	0	0	14.9	5.0	0	0

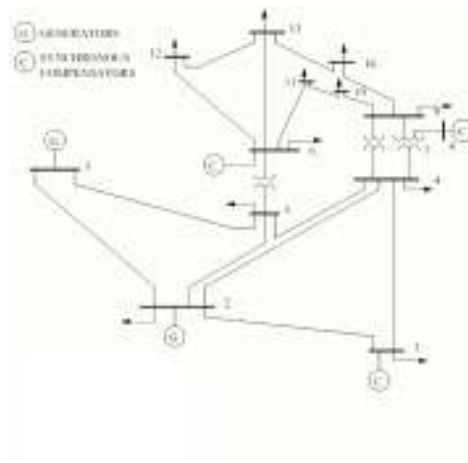


Fig.2 IEEE 14 bus test network

Table 2 Line data for IEEE 14 bus test network

From Bus	To Bus	Resistance (p.u)	Reactance (p.u)	Half-line susceptance(B/2)	Transformer tap Settings
1	2	0.01938	0.05917	0.0264	1
2	3	0.04699	0.19797	0.0219	1
2	4	0.05811	0.17632	0.0187	1
1	5	0.05403	0.22304	0.0246	1
2	5	0.05695	0.17388	0.01730	1
3	4	0.06701	0.17103	0.0064	1
4	5	0.01335	0.04211	0	1
5	6	0	0.28202	0	0.952
4	7	0	0.20912	0	0.978
7	8	0	0.17615	0	1
4	9	0	0.55618	0	0.969
7	9	0	0.11001	0	1
9	10	0.03181	0.0845	0	1
6	11	0.09498	0.19890	0	1
6	12	0.12291	0.28581	0	1
6	13	0.06615	0.13027	0	1
9	14	0.12711	0.27038	0	1
10	11	0.08205	0.19207	0	1
12	13	0.22092	0.19988	0	1
13	14	0.17093	0.34802	0	1

Table 3 Cost coefficients for IEEE 14 bus

Gen No.	a_i (\$/MWhr) ²	b_i (\$/MWhr)	c_i \$/hr
1	0.0430293	20	100
2	0.25	20	70
3	0.01	40	100
4	0.01	40	70
5	0.01	40	40

3.2 Results and validation

3.2.1 IEEE 14 bus results

3.2.1.1 Ordinary NR using single slack bus

Table 4 shows IEEE 14 bus output data with single slack bus, while Table 5 shows IEEE 14 bus line flows and losses with single slack bus.

Table 4 IEEE 14 bus output data with single slack bus

Bus No.	V (pu)	Angle	P _G	Q _G	P _L	Q _L	P _J	Q _J
1	1.0600	0.0000	232.593	-15.233	0.000	0.000	232.593	-15.233
2	1.0450	-4.989	40.000	47.928	21.700	12.700	18.300	35.228
3	1.0100	-12.7487	0.000	27.758	94.200	19.000	-94.200	8.758
4	1.0133	-10.2429	0.000	0.000	47.800	-3.900	-47.800	3.900
5	1.0166	-8.7606	0.000	0.000	7.600	1.600	-7.600	-1.600
6	1.0700	-14.447	0.000	0.000	11.200	7.500	-11.200	15.526
7	1.0457	-13.2375	0.000	23.026	0.000	0.000	0.000	0.000
8	1.0800	-13.2375	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	21.030
9	1.0306	-14.8207	0.000	21.030	29.500	16.600	-29.500	-16.600
10	1.0299	-15.0365	0.000	0.000	9.000	5.800	-9.000	-5.800
11	1.0461	-14.8584	0.000	0.000	3.500	1.800	-3.500	-1.800
12	1.0533	-15.2974	0.000	0.000	6.100	1.600	-6.100	-1.600
13	1.0466	-14.2814	0.000	0.000	13.500	5.800	-13.500	-5.800
14	1.0193	-16.0721	0.000	0.000	14.900	5.000	-14.900	-5.000
TOTAL			272.593	104.509	259.000	73.500	13.593	31.009

Generation cost:

SSB thermal cost: 4814.131 \$/Hr

SSB overall cost: 4781.009 \$/Hr

Convergence achieved after: 7 iterations

Table 5 IEEE 14 bus line flows and losses with single slack bus

From-To	P(MW)	Q(Mvar)	From-To	P(MW)	Q(Mvar)	Loss (MW)	Loss(Mvars)
1-2	157.080	-17.484	2-1	-152.772	30.369	4.309	13.155
1-5	75.513	7.981	5-1	72.740	3.464	2.773	11.455
2-3	73.396	5.936	3-2	71.063	3.894	2.333	9.830
2-4	55.943	2.935	4-2	54.273	2.132	1.670	5.067
2-5	41.733	4.738	5-2	40.813	-1.929	0.920	2.890
3-4	-23.137	7.752	4-3	23.528	-6.753	0.391	0.998
4-5	-59.585	11.574	5-4	60.064	-10.063	0.479	1.511
4-7	27.066	-15.396	7-4	-27.066	17.372	0.000	1.932
4-9	15.464	-2.640	9-4	15.464	3.932	0.000	1.292
5-6	45.889	-20.843	6-5	-45.889	26.617	0.000	5.774
6-11	8.287	8.898	11-6	-8.165	-8.641	0.123	0.257
6-12	8.064	3.176	12-6	-7.9485	-3.008	0.081	0.168
6-13	18.337	9.981	13-6	-18.085	-9.485	0.252	0.496
7-8	0.000	-20.362	8-7	0.000	21.030	0.000	0.668
7-9	27.066	14.798	9-7	-27.066	-13.840	0.000	0.957
9-10	4.393	-0.904	10-9	-4.387	0.920	0.006	0.016
9-14	8.637	0.321	14-9	-8.547	-0.131	0.089	0.190
10-11	-4.613	-6.720	11-10	4.665	6.841	0.051	0.120
12-13	1.884	1.408	13-12	-1.873	-1.398	0.011	0.010
13-14	6.458	5.083	14-13	-6.353	-4.869	0.105	0.215
TOTAL LOSS						13.593	56.910

3.2.1.2 IEEE 14 bus distributed slack bus model

Table 6 shows bus output data with distributed slack bus using real power PF. Table 7 shows IEEE 14 bus line flows and losses with distributed slack bus using real power PF, while, Table 8 and Table 9 show IEEE 14 bus output data with distributed slack bus using reactive power PF, and IEEE 14 bus line flows and losses with distributed slack bus for reactive power PF respectively.

Table 6 IEEE 14 bus output data with distributed slack bus using real power PF

Bus No.	V (pu)	Angle	P _G	Q _G	P _L	Q _L	P _I	Q _I
1	1.0700	11.8713	232.408	6.325	0.000	0.000	232.408	6.325
2	1.0450	7.1139	40.001	27.802	21.700	12.700	18.301	15.102
3	1.0100	-0.6377	0.000	27.037	94.200	19.000	-94.200	8.037
4	1.0144	1.8474	0.000	0.000	47.800	-3.900	-47.800	3.900
5	1.0186	3.3143	0.000	0.000	7.600	1.600	-7.600	-1.600
6	1.0700	-2.3537	0.000	21.944	11.200	7.500	-11.200	14.444
7	1.0462	-1.1461	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
8	1.0800	-1.1461	0.000	20.695	0.000	0.000	0.000	20.695
9	1.0311	-2.7297	0.000	0.000	29.250	16.600	-29.500	-16.600
10	1.0304	-2.9452	0.000	0.000	9.000	5.800	-9.000	-5.800
11	1.0464	-2.7663	0.000	0.000	3.500	1.800	-3.500	-1.800
12	1.0533	-3.2039	0.000	0.000	6.100	1.600	-6.100	-1.600
13	1.0467	-3.2385	0.000	0.000	13.500	5.800	-13.500	-5.800
14	1.0196	-3.9797	0.000	0.000	14.900	5.000	-14.900	-5.000
TOTAL			272.409	103.803	259.000	73.500	13.409	30.303

Table 7 IEEE 14 bus line flows and losses with distributed slack bus using real power PF

From-To	P(MW)	P(MW)	From-To	P(MW)	P(MW)	Loss (MW)	Loss(Mvars)
1-2	156.840	0.349	2-1	-152.677	12.364	4.164	12.713
2-3	75.567	11.815	3-2	-72.807	-0.419	2.761	11.397
2-4	73.320	5.944	4-2	-70.991	3.866	2.328	9.810
1-5	55.924	2.243	5-1	-54.257	2.815	1.667	5.058
2-5	41.735	3.572	5-2	-40.820	-0.778	0.915	2.794
3-4	-23.209	7.058	4-3	23.595	-6.071	0.387	0.987
4-5	-59.725	9.739	5-4	60.200	-8.241	0.475	1.499
5-6	27.100	-15.087	6-5	-27.100	16.999	0.000	1.912
4-7	15.487	-2.515	7-4	-15.487	3.804	0.000	1.289
7-8	45.827	-20.042	8-7	-45.827	25.706	0.000	5.664
4-9	8.253	8.793	9-4	-8.132	-8.541	0.121	0.253
7-9	8.057	3.163	9-7	-7.976	-2.996	0.080	0.167
9-10	18.317	9.927	10-9	-18.066	-9.433	0.251	0.494
6-11	0.000	-20.049	11-6	0.000	20.695	0.000	0.647
6-12	27.100	14.825	12-6	-27.100	-13.866	0.000	0.959
6-13	4.424	-0.807	13-6	-4.418	0.823	0.006	0.016
9-14	8.662	0.384	14-9	-8.572	-0.192	0.090	0.191
10-11	-4.582	-6.623	11-10	4.632	6.741	0.050	0.117
12-13	1.876	1.396	13-12	-1.865	-1.386	0.011	0.010
13-14	6.432	5.019	14-13	-6.328	-4.808	0.104	0.211
TOTAL LOSS					13.409	56.187	

Generation cost:

DSB thermal cost: 4801.906

DSB overall cost: 4768.870

Convergence achieved after: 6 iterations

Table 8 IEEE 14 bus output data with distributed slack bus using reactive power PF

Bus No.	V (pu)	Angle	P _G	Q _G	P _L	Q _L	P _I	Q _I
1	1.0500	12.0665	223.861	-35.774	0.000	0.000	223.861	-35.774
2	1.0450	7.0834	46.150	57.193	21.700	12.700	24.450	44.493
3	1.0200	-0.6686	2.287	37.215	94.200	19.000	-91.913	18.215
4	1.0142	1.8161	-1.790	-5.224	47.800	-3.900	-49.590	-1.324
5	1.0172	3.3072	2.114	-0.211	7.600	1.600	-5.486	-1.811
6	1.0800	-2.3425	7.030	40.454	11.200	7.500	-4.170	32.954
7	1.0503	-1.1766	-0.000	-5.963	0.000	0.000	-0.000	-5.963
8	1.1000	-1.1738	0.032	31.006	0.000	0.000	0.032	31.006
9	1.0337	-2.7573	-0.000	0.000	29.500	16.600	-29.500	-16.600
10	1.0326	-2.9662	-0.000	0.000	9.000	5.800	-9.000	-5.800
11	1.0475	-2.7727	-2.080	-4.273	3.500	1.800	-5.580	-6.073
12	1.0535	-3.1932	-1.657	-3.322	6.100	1.600	-7.757	-4.922
13	1.0471	-3.2329	-3.344	-6.339	13.500	5.800	-16.844	-12.139
14	1.0213	-3.9896	-0.000	0.000	14.900	5.000	-14.900	-5.000
TOTAL			272.603	104.762	259.000	73.500	13.603	31.262

Table 9 IEEE 14 bus line flows and losses with distributed slack bus for reactive power PF

From-To	P(MW)	Q(Mvars)	From-To	P(MW)	Q(Mvars)	Loss (MW)	Loss(Mvars)
1-2	150.170	-33.304	2-1	-146.011	46.002	4.159	12.698
2-3	73.691	3.152	3-2	-71.025	7.853	2.666	11.006
2-4	72.822	0.832	4-2	-70.540	8.783	2.282	9.615
1-5	55.951	2.328	5-1	-54.282	2.736	1.669	5.063
2-5	41.689	4.351	5-2	-40.772	-1.554	0.916	2.797
3-4	-21.374	12.377	4-3	21.767	-11.374	0.393	1.003
4-5	-59.781	12.541	5-4	60.265	-11.014	0.484	1.527
5-6	27.194	-17.195	6-5	-27.194	19.253	0.000	2.058
4-7	15.512	-3.045	7-4	-15.512	4.354	-0.000	1.309
7-8	46.047	-24.905	8-7	-46.047	31.125	0.000	6.221
4-9	10.349	12.729	9-4	-10.130	-12.270	0.219	0.459
7-9	9.751	6.551	9-7	-9.606	-6.248	0.145	0.303
9-10	21.776	16.317	10-9	-21.356	-15.490	0.420	0.827
6-11	-0.032	-29.606	11-6	0.032	31.006	0.000	1.400
6-12	27.226	16.257	12-6	-27.226	-15.254	-0.000	1.003
6-13	4.501	-0.278	13-6	-4.495	0.294	0.006	0.016
9-14	8.737	0.724	14-9	-8.646	-0.529	0.091	0.194
10-11	-4.505	-6.094	11-10	4.550	6.197	0.044	0.103
12-13	1.849	1.327	13-12	-1.839	-1.317	0.010	0.009
13-14	6.351	4.668	14-13	-6.254	-4.471	0.097	0.197
TOTAL LOSS						13.603	57.809

Generation cost:

DSB reactive with RE cost: 757.623 \$/Hr

DSB reactive thermal cost: 834.150 \$/Hr

Convergence achieved after: 4 iterations

Therefore the total cost is:

DSB with RE using combined PF (Thermal): $(4801.906 \cdot 0.8) + (834.150 \cdot 0.2) = 4008.3548$ \$/Hr

DSB with RE using combined PF (With RE): $(4768.870 \cdot 0.8) + (757.623 \cdot 0.2) = 3966.6206$ \$/Hr

3.3 Analysis and discussion

Table 10 and Table 11 show comparison of generated real power, and comparison of generation costs, respectively.

Table 10 Comparison of generated real power

		Single Slack Bus Model	Distributed Slack Bus using Real Power PF	Distributed Slack Bus using Reactive Power PF
Generation:	Plant 1	232,593 MW	232,408 MW	223,861 MW
	Plant 2	40,000 MW	40,001 MW	46,150 MW
Total System Losses		13,593 MW	13,409 MW	13,603 MW

Table 11 Comparison of generation costs

	Single Slack Bus Model	Distributed Slack Bus Model With Real Power PF	Distributed Slack Bus Model With Combined PF
Generation Cost for Thermal Generators (\$/Hr)	4814,131	4801,906	4008,3548
Generation Cost for Thermal & RE Generators (\$/Hr)	4781,009	4768,870	3966,6206

Fig.3 and Fig.4 show the voltage profile comparison, and voltage angle comparison respectively.

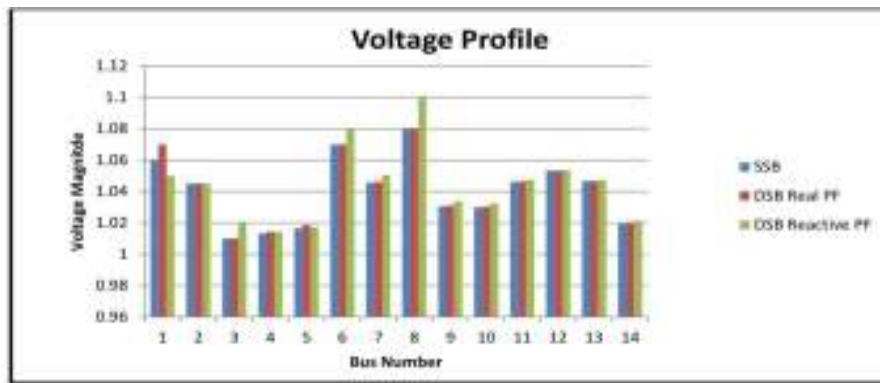


Fig.3 Voltage profile comparison

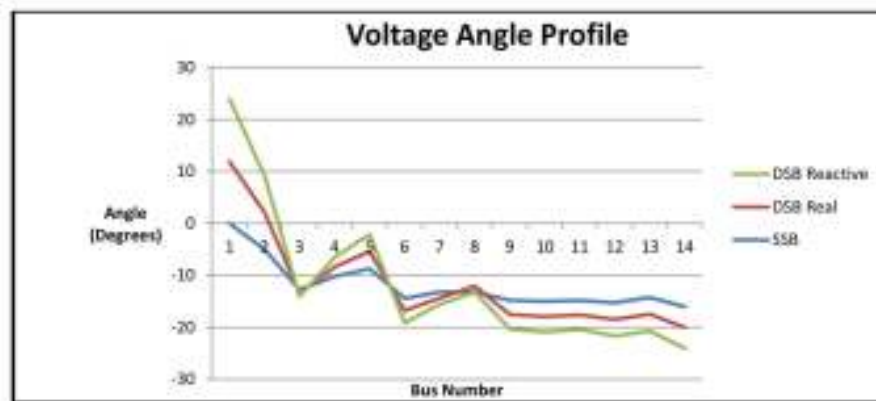


Fig.4 Voltage angle comparison

From Fig.3, it is observed that the voltage magnitudes between buses are relatively similar. Voltage angles vary significantly in the two models as shown in Fig.4. In the SSB model, bus 1 was taken as the reference bus with a phase angle of 0. With the DSB models, the DSB distributes system mismatches to all PV buses in the system through participation factors resulting in a change in phase angles. Power losses reduce by 0.184 MW in the DSB model using real power participation factors compared to the SSB. However, the DSB using reactive power participation factors does not improve on the losses, this is because reactive power represents the power absorbed by the system. The generator real power outputs with a DSB are slightly less than the real power outputs with a SSB as illustrated in Table 10. This results in a lower generation cost in the DSB model as demonstrated in

Table 11. The incorporation of renewable energy reduces the cost of generation in both the SSB and DSB as demonstrated in Table 11.

4 Conclusion

Slack bus modeling for distribution power flow analysis has been studied and investigated. Firstly, the distribution power with a DSB model has been studied. Secondly, scalar participation factors to distribute uncertain real and reactive power system losses have been used for three phase power flow calculations. Finally, renewable energy sources including wind and solar generators have been incorporated in the system as distributed generators and the cost of generation has been compared to that of a system without renewable energy. The DSB provided a realistic approach to analyzing a power system as compared to the SSB and emerged as a more realistic technique to be employed in deregulated distributed generation systems involving renewable energy. The DSB has an effect of distributing the system losses thereby allowing dispersed generators to adjust their outputs appropriately to meet the load and loss requirements of the network. This is achieved through application of participation factors combined participation factors based on the generation capacity. The algorithm developed has been found to be robust and can be implemented in larger systems. The developed DSB can be applied in; capacitor placement and sizing, network reconfiguration, distributed system expansion and service restoration.

References

1. O. Billy, "Distributed slack bus for economic dispatch of renewable energy", Graduation Project, University of Nairobi, Kenya, 2015.
2. A. Mohapatra, "Distributed slack bus algorithm for economic load dispatch", B. Tech Thesis, NIT Rourkela, 2012.
3. T. Shiqiong, M. Kleinberg, and K. Miu, "A distributed slack bus model and its impact on distribution system application techniques", IEEE International Symposium on Circuits and Systems, Japan, 2005.
4. R. Jabr, and B.C. Pal, "Intermittent wind generation in optimal power flow dispatching", IET Generation, Transmission and Distribution, Vol. 3, No.1, PP.66 -74, 2009.
5. M. Amita, V. Prasad, and S. Rangnekar, "Economic dispatch using particle swarm optimization: A review", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol.13, Issue 8, PP.2134-2141, 2009.
6. P. Musau, and N. Odero, "Distributed slack bus model for a wind-based distributed generation using combined participation factors" International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, Vol.2, Issue 10 PP.459-469, 2012.

Надійшла 20.05.2019

Received 20.05.2019

УДК 621.3.011.74.005

В.В. Михайленко, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0002-0973-4612

В.А. Святненко, старший викладач, ORCID 0000-0002-0518-1045

Ю.М. Чуняк, асистент, ORCID 0000-0002-4506-912X

О.С. Чарняк, студентка

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

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ У ПЕРЕТВОРЮВАЧІ З ОДИНАДЦЯТИЗОННИМ РЕГУЛЮВАННЯМ НАПРУГИ

Метою роботи є розробка математичної моделі напівпровідникового перетворювача з високочастотним широтно-імпульсним перетворенням параметрів електричної енергії з використанням пакету MATCAD.

У цій статті проведено аналіз електромагнітних процесів в електричних колах напівпровідниковими з комутаторами. Створено математичну модель для аналізу електромагнітних процесів в напівпровідникових перетворювачах з широтно-імпульсним регулюванням вихідної напруги. Наведено графіки, що відображають електромагнітні процеси у електричних колах. Стаття присвячена розвитку метода багатопараметричних функцій шляхом розробки нових математичних моделей та визначення функцій і алгоритмічних рівнянь для аналізу за підсистемними складовими електромагнітних процесів у розгодуваних електричних колах з напівпровідниковими комутаторами і ланками з синусоїдальними, постійними і імпульсними напругами. Напівпровідникові комутатори можуть виконувати високочастотне

© В.В. Михайленко, В.А. Святненко, Ю.М. Чуняк, О.С. Чарняк, 2019

змінення структури електричних кіл і широтно-імпульсну модуляцію фазних і лінійних напруг трифазної мережі електроживлення, виконуючи регулювання вихідних напруг напівпровідникових перетворювачів параметрів електричної енергії.

Ключові слова: електромагнітні процеси, вихідні напруга та струм, багатопараметричні модулюючі функції, напівпровідникові комутатори, моделювання.

Зміни у перетворенні електричної енергії, а також розвиток напівпровідникової техніки дозволяють використовувати в перетворювальних установках ланку високої частоти з частотою переключення вентилів значно більшою від частоти змінної напруги промислової мережі. В тих випадках, коли за вимогами навантаження необхідно забезпечити його гальванічну розв'язку з електричною мережею при багатозонному регулюванні вихідної напруги, в якості проміжних структур доцільно використовувати структури перетворювачів частоти з однократною модуляцією (ПЧ з ОМ). У [1-3] показана доцільність використання структур ПЧ з ОМ в діагностичних комплексах електромеханічних систем для побудови вторинних джерел живлення з різним видом вихідної енергії. У даній роботі проводиться аналіз використання тієї ж структури в якості ланки високої частоти перетворювачів трифазної напруги в постійну напругу при підключенні силових модуляторів (СМ) до лінійних проводів електричної мережі і широтно-імпульсним регулюванням (ШПР) постійної напруги при одинадцятизонному керуванні. Таке з'єднання дозволяє покращити форму вхідних струмів перетворювача за рахунок відсутності в них гармонік, які кратні трьом.

Структурна схема перетворювача показана на рис. 1. На структурній схемі позначені: СМ_{АВ}, СМ_{ВС}, СМ_{СА} – силові модулятори відповідних лінійних напруг, сукупність яких представляє собою ланку високої частоти перетворювача, ВВ – високочастотний випрямляч, Н – навантаження. Кожний з СМ складається з *N* інверторів випрямленої напруги (ІВН), які включені електричними входами паралельно і навантажені на узгоджувальні трансформатори (ТВ), з'єднані вторинними обмотками послідовно.

При складанні математичної моделі перетворювача з комп'ютерною орієнтацією її застосування використовуємо метод багатопараметричних модулюючих функцій [2], який передбачає попереднє представлення алгоритмічного рівняння перетворювача. При цьому приймемо такі припущення: вхідна електрична мережа симетрична і її внутрішній опір дорівнює нулю, транзистори і діоди ІВН представляються ідеальними ключами, узгоджувальні трансформатори в кожній з зон регулювання вихідної не мають втрат, а навантаження перетворювача має еквівалентний активно-індуктивний характер.

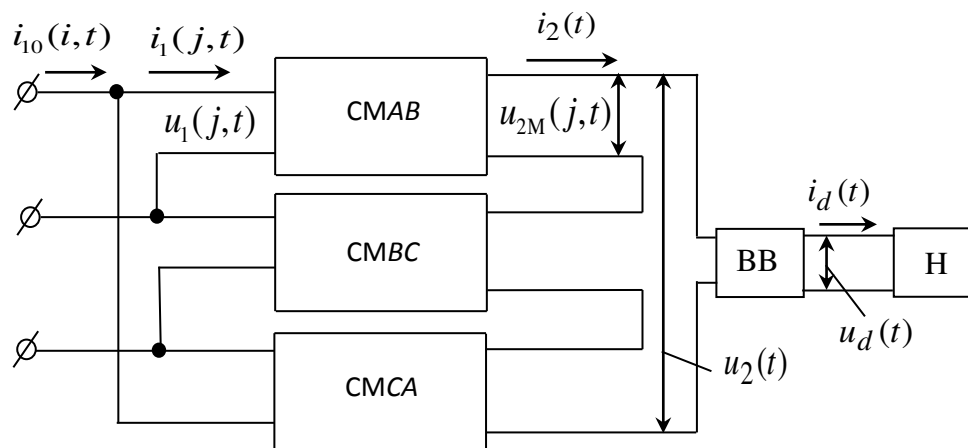


Рис. 1. Структурна схема перетворювача

Така структура дозволяє реалізувати багатоканальний спосіб перетворення параметрів електромагнітної енергії мережі, при якому в СМ здійснюється розгалужена модуляція миттєвих значень лінійних напруг трифазної енергетичної мережі, частоти ω_1 , відповідними еквівалентними модулюючими впливами $\psi(\alpha_p, t)$, частоти ω_2 . В результаті такої операції на виході кожного з ІВН формується промодульована напруга

$$u_{2M}(p, j, t) = \frac{1}{k_T} u_1(j, t) \phi(j, t) \psi(\alpha_p, t), \quad (1)$$

де: $j = 1, 2, 3$ – номери лінійних напруг енергетичної мережі, відповідно AB, BC, CA ; k_T – коефіцієнти трансформації узгоджувального трансформатора; $p = 1, 2, 3, \dots, n$ – номер зони регулювання вихідної напруги, збігається з номером інвертора СМ; $\phi(j, t)$ – функції прямокутних синусів, які співпадають за положенням в часовій області з відповідними лінійними напругами мережі:

$$\phi(j, t) = \text{sign} \left\{ \sin \left(\omega_1 t + \frac{\pi}{6} - \frac{(j-1)2\pi}{3} \right) \right\}; \quad (2)$$

де: $u_1(j, t)$ – миттєві значення лінійних напруг енергетичної мережі:

$$u_1(j, t) = U_{1m} \sin \left(\omega_1 t + \frac{\pi}{6} - \frac{(j-1)2\pi}{3} \right); \quad (3)$$

U_{1m} – амплітудне значення фазної напруги.

Еквівалентні модулюючі впливи подамо виразом

$$\psi(\alpha_p, t) = \frac{1}{2} \sum_2 \text{sign}(\sin(\omega_2 t \pm \alpha_p(t) - \Phi)) , \quad (4)$$

де $\alpha_p(t)$ – кути управління, за рахунок зміни яких забезпечується ШПР вихідної напруги перетворювача; Φ – початкова фаза еквівалентних модулюючих впливів.

При багатозонному регулюванні вихідної напруги перетворювача забезпечується почергово зміна кутів управління в діапазоні від 0 до 90° . Умови зміни кутів управління у окремих зонах подамо у вигляді: $\alpha_p(t) = 0$, якщо $t < \frac{(p-1)T}{N=20}$; $\alpha_p(t) = 180^\circ$, якщо $t > \frac{pT}{N=20}$, а інакше $\alpha_p(t) = f_\mu(p, 20, t)$, де

$f_\mu(p, 20, t)$ – функція, яка задає закон зміни $\alpha_p(t)$, яка залежить від номера зони p і їх кількості

Вихідну напругу $u_2(t)$ ланки високої частоти перетворювача, згідно з його структурною організацією і з виразом (1), запишемо сумою

$$u_2(t) = \sum_{p=1}^{N=20} \sum_{j=1}^3 \frac{1}{k_T} u_1(j, t) \phi(j, t) \psi(\alpha_p, t) , \quad (5)$$

а вихідну напругу перетворювача $u_d(t)$ як випрямлену напругу (6) подамо виразом

$$u_d(t) = \sum_{p=1}^{N=20} \sum_{j=1}^3 \frac{1}{k_T} u_1(j, t) \phi(j, t) \psi(\alpha_p, t) v(t) , \quad (6)$$

де: $v(t)$ – функція прямокутного синуса, що співпадає за часом з положенням вихідної напруги $u_2(t)$ ланки високої частоти перетворювача

$$v(t) = \text{sign}(u_2(t)) . \quad (7)$$

Часові діаграми вихідних напруг ІВН $u_{2M}(p, j, t)$, ланки високої частоти $u_2(t)$ і перетворювача $u_d(t)$, побудовані за (5) і (6) при зміні величини кута управління α_p по лінійному закону в координатах від часу t , подані на рис. 3.

Для більш детального аналізу вихідної напруги перетворювача в (5) позначимо $u_1(j, t) \phi(j, t) = |u_1(j, t)|$ і, враховуючи (3) та (4), а також те, що в (6) $\psi(\alpha_p, t) v(t) = |\psi(\alpha_p, t)|$, алгоритмічне рівняння перепишемо у вигляді

$$u_d(t) = \frac{1}{2k_T} \sum_{p=1}^{N=20} \left(\sum_{j=1}^3 \left| U_{1m} \sin \left(\omega_1 t + \frac{\pi}{6} - \frac{(j-1)2\pi}{3} \right) \right| \left| \sum_2 \sin n(\omega_2 t \pm \alpha_p(t) - \Phi) \right| \right) . \quad (8)$$

Струм навантаження знайдемо, як реакцію одноконтурного RL -ланцюга на дію напруги (6). Для цього диференціальне рівняння, складене для вихідного контуру перетворювача, представимо в виді

$$D(t, y) = \frac{u_d(t)}{L} - \frac{R}{L} y_0, \quad (9)$$

де: y_0 – визначається з початкових умов; R і L – відповідно активний опір і індуктивність навантаження.

Рішення (9) відносно струму навантаження визначимо числовим методом у вигляді матриці

$$i_d(t) = \text{rkfixed}(y, 0, k, s, D), \quad (10)$$

де: y – вектор початкових умов; $0, k$ – часовий інтервал рішень; s – кількість точок на часовому інтервалі рішень; D – вектор функція диференціальних рівнянь.

Часові діаграми струму навантаження в координатах вихідної напруги перетворювача і вихідного струму ланки високої частоти для одинадцятизонного регулювання представлені на рис. 2.

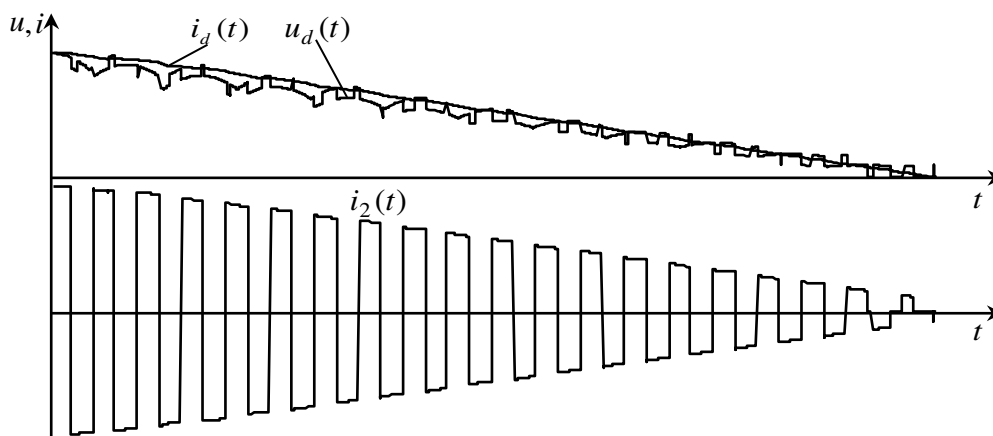


Рис. 2. Часові діаграми струму навантаження в координатах вихідної напруги перетворювача і вихідного струму ланки високої частоти

Враховуючи ту обставину, що на інтервалах нульових пауз (7) струм навантаження підтримується в контурі навантаження і діодів ВВ за рахунок енергії, яка запасається в індуктивності за попередні цикли роботи перетворювача і з електричної мережі не споживається, то для визначення вихідного струму $i_2(t)$ ланки високої частоти достатньо (10) перемножити на функцію (7), що має одиничну амплітуду і співпадає за часом з (6). Тоді

$$i_2(t) = i_d(t)v(t) \quad (11)$$

Для визначення вхідних струмів інверторів кожної p -ї зони регулювання врахуємо, що $i_2(t)$ протікає в загальному контурі всіх СМ, утвореному послідовно з'єднаними вторинними обмотками узгоджувальних трансформаторів і приймемо до уваги алгоритмічне рівняння (6) і те, що (2), (4) і (7) є функціями одиничної амплітуди.

При цьому у загальному виді:

$$i_1(n, j, t) = \frac{i_2(t)\psi(\alpha_p, t)\phi(j, t)}{k_T} \quad (12)$$

Для визначення вхідних СМ у всьому діапазоні регулювання вихідної напруги підсумуємо вхідні струми відповідних ІВН. Враховуючи (12), загальний вираз для вхідних струмів СМ подамо у вигляді

$$i_1(j, t) = \sum_{p=1}^{N=20} i_1(p, j, t), \quad (13)$$

де: $i_1(p, j, t)$ – вхідні струми ІВН.

Часові діаграми вхідних струмів відповідних СМ, побудовані за (13), представлені на рис. 3.

Вхідні струми перетворювача знаходимо з співвідношень

$$i_{10}(1, t) = i_1(1, t) - i_1(3, t)$$

$$\begin{aligned} i_{10}(2,t) &= i_1(2,t) - i_1(1,t) \\ i_{10}(3,t) &= i_1(3,t) - i_1(2,t) \end{aligned} \quad (14)$$

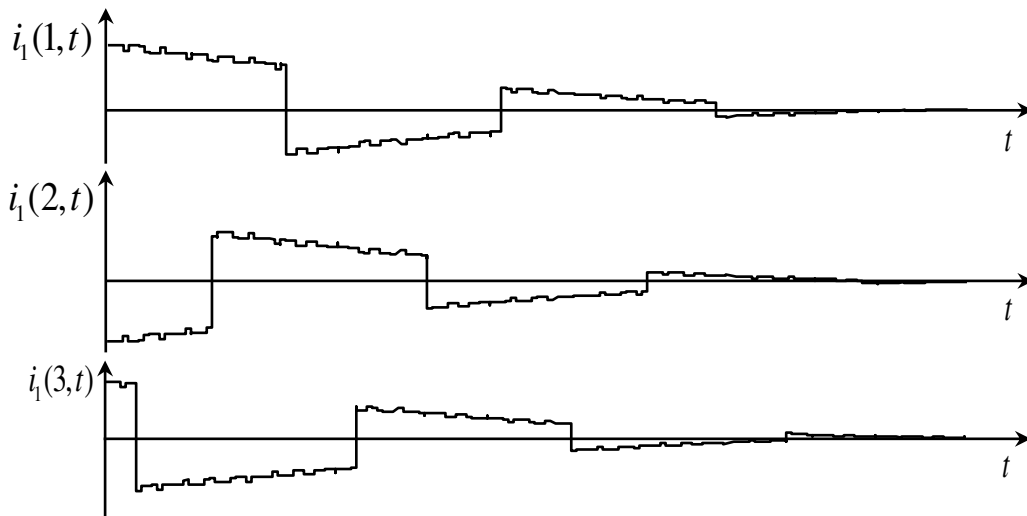


Рис. 3. Часові діаграми вхідних струмів відповідних СМ

Часові діаграми вхідних струмів i -х фаз електричної мережі в координатах фазних напруг, побудовані за (14), представлені на рис. 4.

Таким чином, приведені результати досліджень показують ефективність подання математичної моделі перетворювача відносно напруги навантаження, струму навантаження і струмів, що споживаються з вхідної мережі узагальнюючими функціями багатопараметричного виду. Узагальнюючі функції багатопараметричного виду ефективні і для інших перетворювачів модуляційного типу.

Дослідження показують ефективність використання багатопараметричних модулюючих функцій для моделювання і розрахунку електромагнітних процесів у розгалужених електричних колах напівпровідникових перетворювачів з багатозонним високочастотним широтноімпульсним регулюванням їхньої вихідної напруги при живленні RL-навантаження.

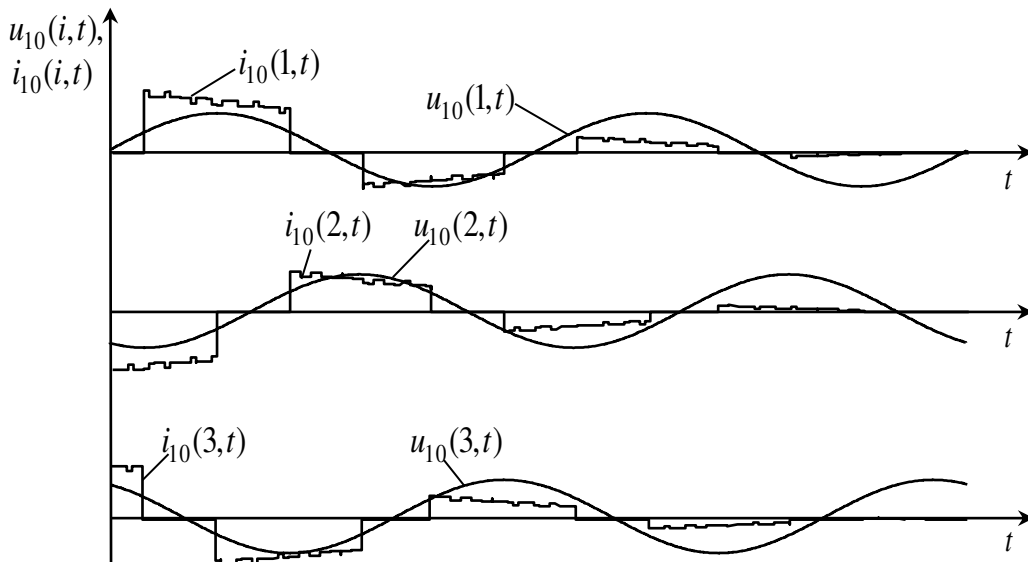


Рис. 4. Часові діаграми вхідних струмів та напруг i -х фаз електричної мережі

Висновки. Підтверджено доцільність використання програмного пакету MATHCAD для аналізу електромагнітних процесів та оптимізації параметрів напівпровідникових перетворювачів. Такий підхід дозволяє зменшити нестабільність режимів у технологічному навантаженні та режимів споживання електроенергії від мережі електроживлення.

Список літератури

1. Макаренко М.П. Аналіз електромагнітних процесів у перетворювачах з багатозонним регулюванням вихідної напруги функціями багатопараметричного виду / М.П. Макаренко, В.В. Михайленко // Технічна електродинаміка. Силова електроніка та енергоефективність - Тематичний випуск - 2002. - Ч.1. - С.19-22.
2. Макаренко М.П. Напівпровідникові перетворювачі електромеханічних комплексів з покращеною електромагнітною сумісністю / М.П. Макаренко, В.В. Михайленко, А.А. Щерба, М.М. Юрченко // Вестник НТУ "Харьковский политехнический институт". "Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика". – 2003.– Вып. 13. – Т. 2 – С. 213–214.
3. Михайленко В.В. Математична модель напівпровідникового перетворювача трифазної напруги у постійну з тризонним регулюванням вихідної напруги / В.В. Михайленко, В.В. Андрійчук, Я.В. Романчук // Доповіді за матер. МНТК "Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики". – Київ: Політехніка. – 2011. – С. 417–418.

V. Mihaylenko, PhD in Technical Sciences, associate professor, ORCID 0000-0002-0973-4612

V. Sviatnenko, assistant professor, ORCID 0000-0002-0518-1045

J. Chuniak, assistant professor, ORCID 0000-0002-4506-912X

O. Charniak, student

National technical university of Ukraine «Kyjv polytechnic institute of the name Igorya Sikorskiy»

STUDY OF THE ELECTROMAGNETIC PROCESSES IN CONVERTER WITH ELEVEN ZONE REGULATION VOLTAGE

Analysis of the electromagnetic processes is organized beside this article in electric circuit with semiconductor commutator. Mathematical model is created for analysis electro-magnetic processes in semiconductor converter with width pulsed regulation of the output voltage. The brought graphs, which reflect the electromagnetic processes in electric circuit. Method much parametric functions was used when performing calculation. The mathematical model of the converter is created for twenty zoned regulations of the output voltage. Article is devoted to the development of a method of multi-parametric modulating functions by means of working out of new mathematical models and definition of functions and the algorithmic equations for the analysis on subsystem components of electromagnetic processes in electric circuits of variable structure with sinusoidal, direct and pulsing voltage. Introduction of functions with discrete parameters in the algorithmic equations for analysis of processes in circuits with semiconductor commutators simplifies modeling on subsystem components. The mathematical model of steady-state processes and transients in electric circuits of semiconductor converters of modulation type with multi-channel zonal use of phase and line voltages of a three-phase network of power supplies is developed. The mathematical model of electric circuits of thyristor shapers of electro-discharge pulses for the analysis and the matching of capacitors charging modes with decrease several times of electric resistance of technological load is also created. The obtained results have a great value for development theoretical electrical engineering in a direction of simplification of calculations of electromagnetic processes in electric circuits with semi-conductor converters of the electric power. The Electromagnetic processes in electric circuit under width-pulse regulation possible to analyse with use the algorithmic equations multivariable function, which argument are a system parameters semiconductor commutator, signal of control, phases to network of the power supply and time. Introduction multivariable function with discrete parameter in algorithmic equations of the analysis formed and connecting processes in electric circuit of the variable structure allows to reflect change of this structure under system components, simplifying modeling and analysis of such processes to account of the generalization of the got equations. Except specified correlations and diagrams designed model allows to analyse forms of the output voltages and current of the separate power modules.

Key words: electromagnetic processes, output voltage and current, multi parametric modulating functions, semi-conductor commutators, modeling.

References

1. Makarenko M.P. The Analysis of the electromagnetic processes in converter with much zoned regulations of the output voltage function multivariable type/ M.P. Makarenko, V.V. Mihaylenko // Technicheskaia elektrodinamika. Silova elektronika i energoefektivnist - Thematic vypusk. - 2002. – Part 1. – P. 19-22 (Ukr.)
2. Makarenko M.P. Semiconductor converters electromechanic complex with perfected by electric magnetic joining / M.P. Makarenko, V.V. Mihaylenko, A.A. Scherba, N.N. Yurchenko // Vesnik NTU "Kharkovskiy politehnic institute". "Problemes avtomatic electroprivoda. Theory and practice". – 2003.– Issue 13. – Part 2 – P. 213–214 (Ukr.).

3. Mihaylenko V.V. Mathematical model of the semiconductor converter of the three-phase voltage in constant with three zoned regulations of the output voltage / V.V. Mihaylenko, V.V. Andriyuchuk, Y.V. Romanchuk // *Dopovidi za materialamy MNTK "Suchasni prolems electroenergetyki and avtomatic". – Kyjv: Polytechnica. – 2011. – P. 417–418 (Ukr.).*

УДК 621.3.011.74.005

В.В. Михайленко, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0002-0973-4612

В.А. Святненко, старший преподаватель, ORCID 0000-0002-0518-1045

Ю.М. Чуняк, ассистент, ORCID 0000-0002-4506-912X

О.С. Чарняк, студентка

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ С ОДИНАДЦАТИЗОННЫМ РЕГУЛИВАНИЕМ НАПРЯЖЕНИЯ

В этой статье проведено анализ электромагнитных процессов в электрических цепях с полупроводниковыми коммутаторами. Создано математическую модель для анализа электромагнитных процессов в полупроводниковых преобразователях с широтно-импульсным регулированием выходного напряжения. Приведено графики, которые отражают электромагнитные процессы в электрических цепях. При выполнении расчетов использовался метод многопараметрических функций. Математическая модель преобразователя создана для одиннадцатизонного регулирования выходного напряжения. Статья посвящена развитию метода многопараметрических модулирующих функций путем разработки новых математических моделей и определения функций и алгоритмических уравнений для анализа по подсистемным составляющим электромагнитных процессов в разветвленных электрических цепях с полупроводниковыми коммутаторами и звеньями с синусоидальными, постоянными и импульсными напряжениями. Полупроводниковые коммутаторы могут осуществлять высокочастотное изменение структуры электрических цепей и широтно-импульсную модуляцию фазных и линейных напряжений трехфазной сети электропитания, реализуя регулирование выходных напряжений полупроводниковых преобразователей параметров электрической энергии.

Ключевые слова: электромагнитные процессы, выходное напряжение и ток, структура, многопараметрические модулирующие функции, полупроводниковые коммутаторы, моделирование.

Надійшла 26.05.2019

Received 26.05.2019

УДК 62-83-52.003(082)

О.О. Закладний, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0003-2813-3692

Национальный технический университет Украины

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

АЛГОРИТМЫ ЗАХИСТУ ЭЛЕКТРОДВИГУНІВ ЗАСОБАМИ СУЧАСНИХ СИСТЕМ ДІАГНОСТУВАННЯ ЇХ СТАНУ

Традиційні пристрої захисту електродвигунів в повній мірі не вирішують завдання захисту від перевантажень, ушкоджень силового живильного кабелю, перекосу фазних струмів, пов'язаних із внутрішніми аваріями двигуна або з погіршенням опору ізоляції обмоток. Рекомендації, викладені в ПУЕ стосовно захисту електродвигунів, не враховують сучасних вимог щодо надійного захисту двигуна від перегрівання обмоток статора, зумовленого несиметрією напруги живлення, пошкодженням системи охолодження і технологічними перевантаженнями, несиметрією повітряного зазору, викликаного зношуванням підшипників, заклинюванням ротора. Застосування сучасного, надійного й ефективного захисту від аварійних режимів роботи дозволяє значно скоротити кількість і частоту аварійних ситуацій.
© О.О. Закладний, 2019

ції і подовжити термін служби електродвигунів, зменшити витрати електроенергії й втрати від зупинення технологічного процесу. У статті розглянуто принципи побудови захисту електродвигунів за допомогою сучасних систем діагностики енергетичного та технічного станів електропривода з використанням теплової моделі двигуна та контролю струму статора. В тепловій моделі враховано нагріваючі втрати, у тому числі - втрати від несиметрії і несинусоїдальності напруги. Як часо-струмова характеристика захисту приймається переважувальна характеристика електродвигуна, враховуються його початковий режим до виникнення аварійної ситуації та струм зворотної послідовності. В статті представлено алгоритми струмового та теплового захисту, які можуть бути застосовані при розробці сучасних систем діагностики стану електроприводу.

Ключові слова: електропривод, система діагностування, тепла модель, струмовий захист, переважувальна характеристика електродвигуна, алгоритми захисту.

Вступ.

Переважає більшість існуючих пристроїв захисту асинхронних електродвигунів (АД) відрізняються один від одного за своїми функціональними можливостями і мають загальні недоліки: низьку точність встановлення струмів, спрацьовування за максимально допустимого струму, відсутність контролю напруги. Вони в повній мірі не вирішують завдання захисту АД від перевантажень, ушкоджень силового живильного кабелю, перекосу фазних струмів, пов'язаних із внутрішніми аваріями двигуна або з погіршенням опору ізоляції обмоток.

Метою роботи є усунення недоліків пристроїв захисту шляхом використання сучасних інтелектуальних систем діагностування їх стану.

Основні матеріали дослідження.

Аварії АД поділяються на два основних типи: механічні та електричні. До механічних належать: деформація або поломка вала ротора, ослаблення кріплення осердя статора до станини, ослаблення обпресування осердя ротора, виплавлення бабіту в підшипниках ковзання, руйнування сепаратора, кільця або кульок у підшипниках кочення, поломка крильчатки, відкладення пилу й бруду в рухомих елементах тощо [1].

Причиною більшості механічних аварій є радіальна вібрація через асиметрію мережі живлення, механічні перевантаження на валу електродвигуна, виробничий брак комплектуючих елементів або неакуратне складання. До 10% всіх аварій АД мають механічне походження. З них 8% складає частка аварій, пов'язаних з асиметрією фаз, і лише 2% - аварії, пов'язані з механічним перевантаженням. Частка аварій, пов'язаних з браком є незначною, тому її можна не брати до уваги. На сьогодні оцінка ймовірностей виникнення механічних аварій відсутня. Більша їх частина має прихований характер і виявляється лише після відповідних випробувань або розбирання двигуна, однак постійний контроль мережевої напруги та струму АД дозволяє у більшості випадків звести цю ймовірність до мінімуму.

Електричні аварії АД, у свою чергу, поділяються на три типи:

- мережеві аварії;
- струмові аварії, пов'язані з обривом провідників у обмотках статора, ротора або кабеля, міжвитковим і міжфазним замиканнями обмоток, порушенням контактів і руйнуванням з'єднань, виконаних за допомогою паяння або зварювання; аварії, пов'язані з пробоем ізоляції в результаті нагрівання, викликаного протіканням струмів перевантаження або короткого замикання (к.з.);
- аварії, пов'язані зі зниженням опору ізоляції внаслідок її старіння, руйнування або зволоження.

Для того, щоб захистити АД від аварійних режимів, застосовують релейний захист: тепловий, струмовий, температурний і комбінований. Багаторічний досвід експлуатації АД показав, що більшість існуючих пристроїв захисту не гарантують їх безаварійної роботи [1]. Застосування надійного й ефективного захисту від аварійних режимів роботи дозволяє значно скоротити кількість і частоту аварійних ситуацій і подовжити термін служби АД, зменшити витрати електроенергії й втрати від зупинення технологічного процесу.

Рекомендації, викладені в ПУЕ стосовно захисту АД, не враховують сучасних вимог щодо надійного захисту двигуна від перегрівання обмоток статора, зумовленого несиметрією напруги живлення, пошкодженнями системи охолодження і технологічними перевантаженнями, несиметрією повітряного зазору, викликаного зношуванням підшипників, заклинюванням ротора [2].

Одним із перспективних видів захисту від перевантаження є застосування сучасних систем діагностування із використанням математичного моделювання теплового стану АД. У практичних розрахунках найчастіше застосовується розрахунок нагрівання за експонентою, тобто представлення АД одним тілом нагрівання та диференціальним рівнянням першого порядку (рівняння теплового стану)

$$\frac{d\Delta\tau}{dt} = \frac{1}{C} [\Delta P - A\Delta\tau],$$

де $\Delta\tau$ - перевищення температури двигуна над температурою довкілля; t - час; ΔP - потужність втрат енергії в двигуні; C - сумарна теплоємність двигуна; A – сумарна тепловіддача [3].

У різницевій формі, придатній для реалізації на цифровому пристрої, це рівняння має вигляд

$$\Delta\tau_k = \Delta\tau_{k-1} + \frac{\Delta h}{T_n} \left(\frac{(V_1 + V_2 + \Delta P_{дн} + \Delta P_{дт})\Delta\tau_{із} - \Delta\tau_{k-1}}{1,3\Delta P_n} \right),$$

де $\Delta\tau_k$ - перевищення температури в k -й момент часу; $\Delta\tau_{k-1}$ - перевищення температури в $(k-1)$ -ий – момент часу; Δh - крок розрахунку, V_1, V_2 - втрати в обмотках статора і ротора, $\Delta P_{дн}, \Delta P_{дт}$ - додані і додаткові втрати в АД, ΔP_n - номінальні втрати в АД, T_n - стала часу нагрівання при номінальному навантаженні, $\Delta\tau_{із}$ - гранично припустиме перевищення температури ізоляції відповідного класу.

Алгоритм роботи теплового захисту наведено на рис.1. Повне врахування всіх факторів для забезпечення надійного теплового захисту АД практично неможливе, тому доцільно тепловий захист поєднувати зі струмовим .

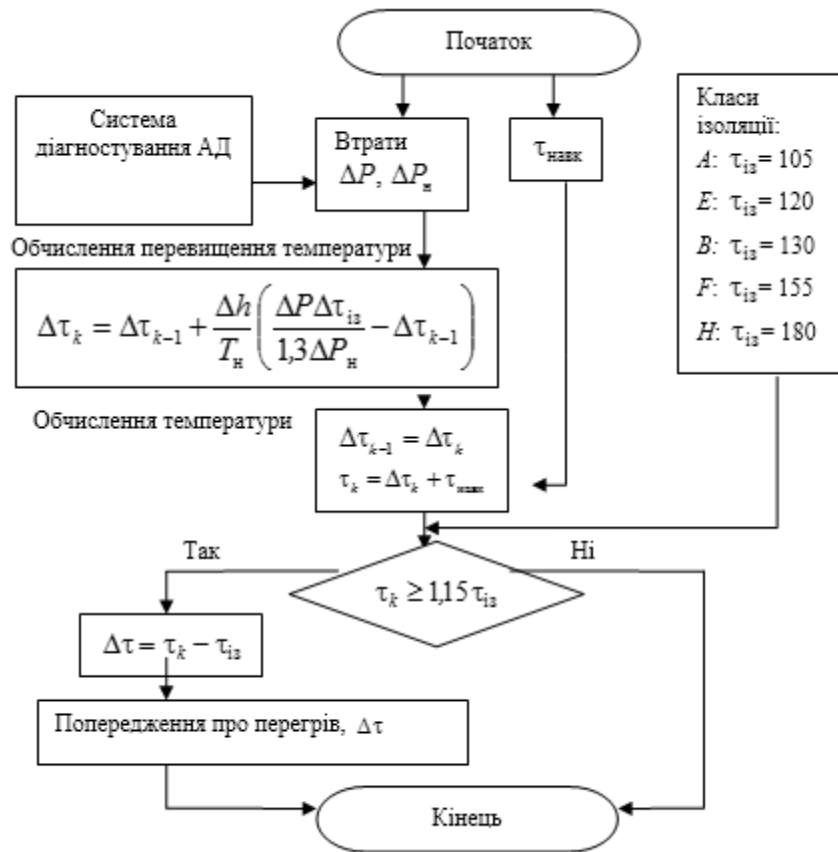


Рисунок 1 – Алгоритм роботи теплового захисту

Аварійні режими роботи в більшості випадків супроводжуються проходженням надструмів у обмотці статора. Небезпечними є насамперед тепловий вплив надструмів і тривалість його проходження. Чим більша кратність струму перевантаження k_f відносно номінального струму, тим менший припустимий час перевантаження

$$t = T_n \ln \frac{1}{1 - \frac{\Delta\tau_{із} - \Delta\tau_0}{k_f^2 \Delta\tau_{ном}}}, \quad (1)$$

де $\Delta\tau_0$ - початкове перевищення температури двигуна [4].

Спрощено формула (1) має вигляд

$$t = T_n \ln \frac{k_I^2 - k_{\text{поч}}^2}{k_I^2 - a},$$

де $k_{\text{поч}}$ - початковий коефіцієнт кратності струму, $a = \frac{\Delta\tau_{\text{із}}}{\Delta\tau_{\text{ном}}}$ - коефіцієнт, який змінюється в межах 1-1,5 і в середньому приймається таким, що дорівнює 1,3 [5].

На рис. 2 зображена перевантажувальна характеристика АД з різними початковими режимами.

В [6] наводиться кілька варіантів часострумової характеристики захисту:

$$t = A_1 \ln \frac{k_I^2}{k_I^2 - 1}, \tag{2}$$

$$t = \frac{A_2}{k_I^2}, \tag{3}$$

$$t = \frac{A_3}{k_I^2 - 1}, \tag{4}$$

де A_1, A_2, A_3 - сталі величини, які вибираються меншими T_n із запасом, який залежить від можливої похибки дії захисту.

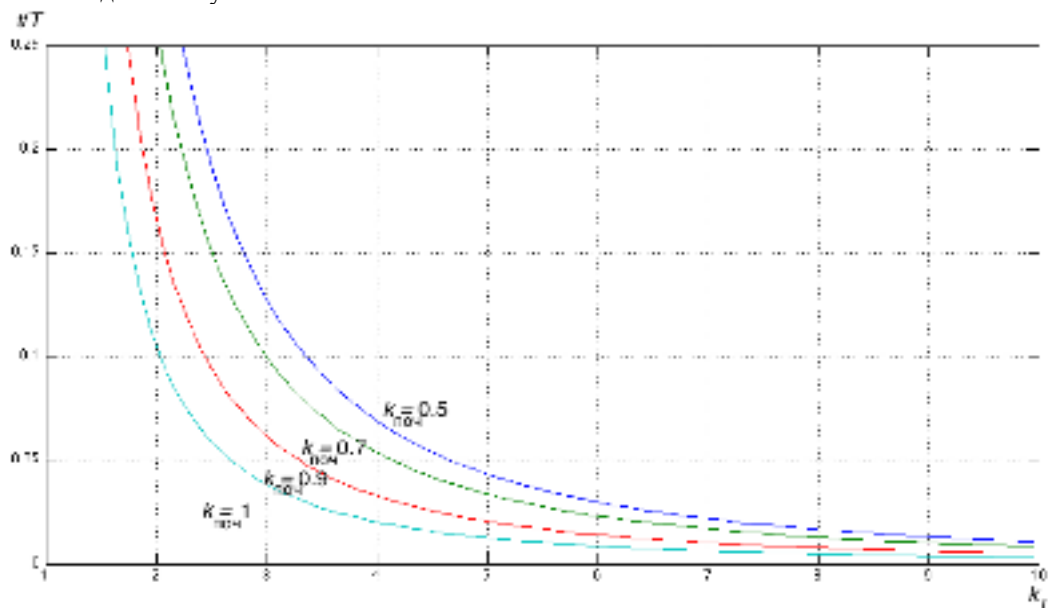


Рисунок 2 – Перевантажувальна характеристика АД

Часострумова характеристика захисту з урахуванням температури навколишнього повітря визначається виразом

$$t = A_1 \ln \frac{k_I^2}{\left(1 - \frac{\tau_{\text{навок}}}{\tau_{\text{дв.доп}}}\right) (k_I^2 - 1)}, \tag{5}$$

де $\tau_{\text{дв.доп}}$ - відповідає температурі АД при струмі перевантаження $(1,15-1,5)I_{\text{ном}}$, коли перегрівання призводить до скорочення терміну служби ізоляції.

Взявши як вихідну точку за ГОСТ 183-74* ($t = 120\text{с}$, $k_I = 1,5$), з урахуванням коефіцієнта запасу $k_3 = 1,1$ можна знайти значення A для формул (2) - (4):

$$t = 186 \ln \frac{k_I^2}{k_I^2 - 1}, \quad (6)$$

$$t = \frac{245}{k_I^2}, \quad (7)$$

$$t = \frac{136}{k_I^2 - 1}. \quad (8)$$

Для рівняння (5) приймаємо $\tau_{\text{навл}} = 25^\circ\text{C}$, а $\tau_{\text{дв.доп}} = 165^\circ\text{C}$ для класу ізоляції В. Тоді

$$t = 145 \ln \frac{k_I^2}{0,85(k_I^2 - 1)}. \quad (9)$$

Як видно з рис.3, часострумові характеристики захисту за формулами (2), (3), (4) значною мірою відрізняються в початковій частині, при незначних струмах перевантаження, а характеристика (5) значно відрізняється від інших при значеннях $k_I > 1,5$.

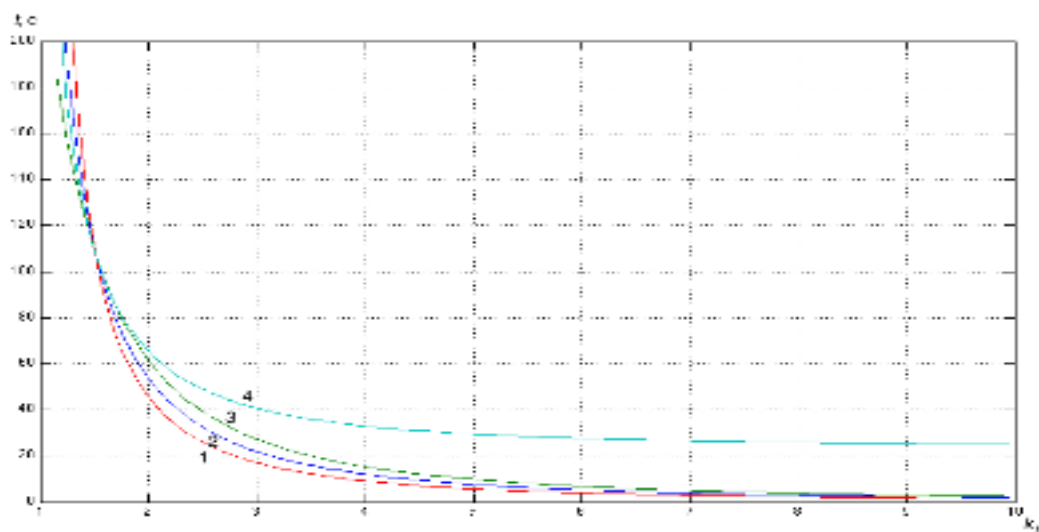


Рисунок 3 – Часострумова характеристика спрацювання захисту:
1 - ф. (8), 2 - ф. (6), 3 - ф. (7), 4 - ф. (9)

Вирази (6) - (9) можуть використовуватися лише для загальної оцінки процесу нагрівання, оскільки базуються лише на одній точці ГОСТ 183-74*. Для точнішого вибору захисного пристрою, наприклад з часострумовою характеристикою типу (3), можна скористатися виразом [4]

$$A_2 = \alpha_{\text{зап}} k_{\text{п}}^2 t_{\text{п}}$$

де $\alpha_{\text{зап}}$ - коефіцієнт, що гарантує відсутність помилкових спрацьовувань захисту при пуску, $k_{\text{п}}$ - кратність пускового струму, $t_{\text{п}}$ - тривалість пуску двигуна.

Для часострумової характеристики (4) згідно [7] приймають $A_3 = 250$ (для закритих АД, що мають великі вагу і розміри) і $A_3 = 150$ (для відкритих АД).

У існуючих пристроїв перевантажувальна здатність двигуна (рис.4) повною мірою не використовується, що є значним недоліком захисту. Особливо це стосується невеликого перевантаження. Таким чином, як часострумову характеристику захисту пропонується використовувати перевантажувальну характеристику. Це дозволяє налагоджувати захист під параметри конкретного АД.

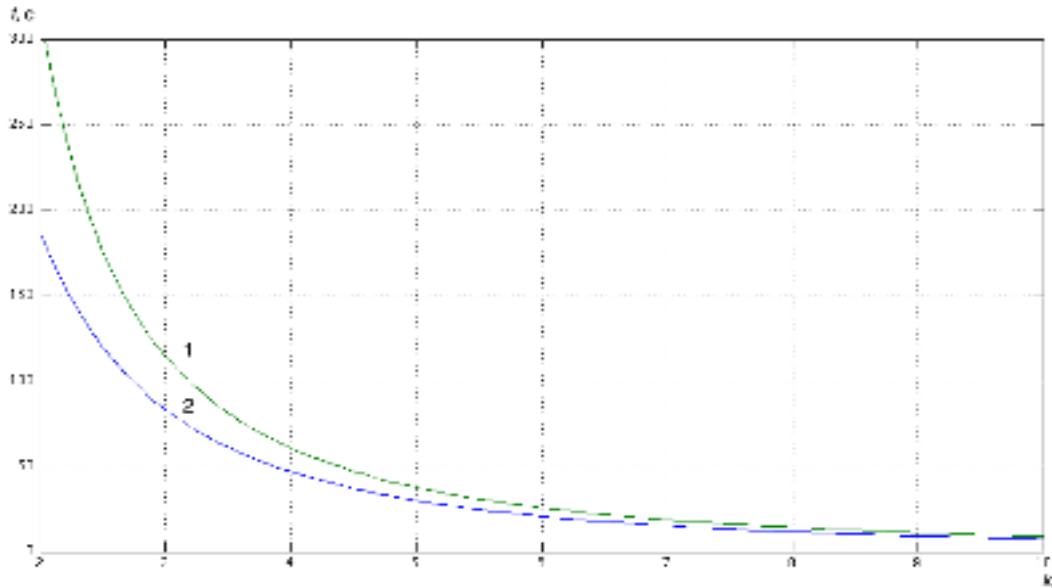


Рисунок 4 – 1 - перевантажувальна характеристика двигуна АД 4A280S2У3,
2 - часострумова характеристика захисту

На рис.5 наведено алгоритм роботи струмового захисту.

АД можуть отримувати теплове перевантаження струмами зворотної послідовності при фазних струмах нижчих струмів спрацювання теплових реле існуючих систем захисту. Наприклад, при «зліпанні фаз» або обриві фази зі сторони високої напруги у понижувального трансформатора зі схемою з'єднання «трикутник-зірка» із заземленою нейтраллю струм в одній із фаз в 2 рази перевищує струм у двох інших [4]. Абсолютні значення струмів прямої та зворотної послідовності дорівнюють один одному, тобто $|I_1| = |I_2|$. Таким чином, захист АД за струмом повинен урахувувати струм зворотної послідовності.

Еквівалентний фазний струм з урахуванням струму зворотної послідовності

$$I_{\text{екв}} = \sqrt{I_{\text{max}}^2 + kI_2^2}, \quad (10)$$

де I_{max} - діюче значення найбільшого фазного струму, I_2 - діюче значення складової зворотної послідовності, k - ваговий коефіцієнт струму I_2 [8].

Для АД k можна знайти за формулою

$$k = 2 \frac{M_{\text{п}}}{M_{\text{н}}} \frac{1}{s_{\text{н}} k_{\text{п}}^2} - 1,$$

де $M_{\text{п}}$, $M_{\text{н}}$ - пусковий та номінальний обертові моменти АД, $k_{\text{п}}$ - кратність пускового струму, $s_{\text{н}}$ - номінальне ковзання. Зазвичай для АД типовим значенням є $k_{\text{п}} = 4,5$ [9].

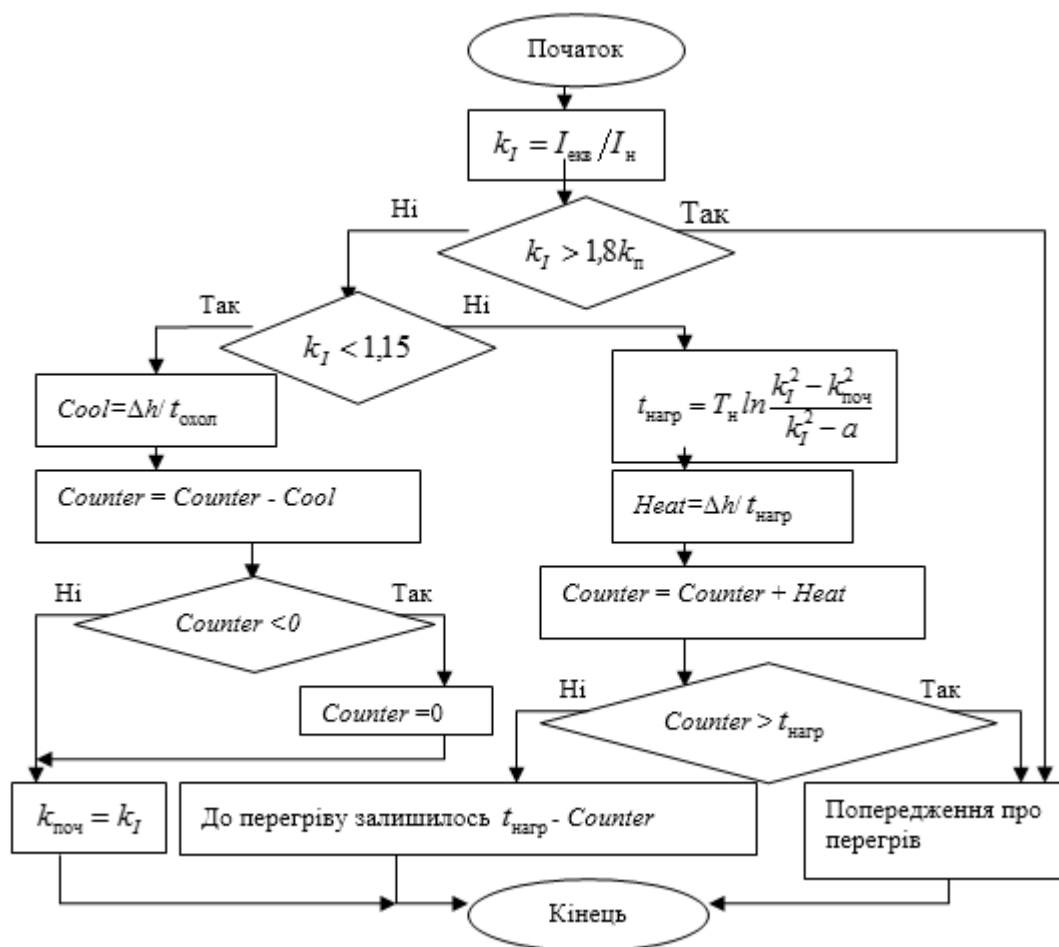


Рисунок 5 – Алгоритм роботи струмового захисту АД

Згідно ГОСТ 13109-97 дозволяється розраховувати напруги зворотної послідовності за спрощеною формулою $U_{2i} = 0,62(U_{i \max} - U_{i \min})$, де $U_{i \max}$, $U_{i \min}$ - найбільше та найменше діюче значення з трьох міжфазних напруг при i -ому спостереженні з урахуванням гармонічних складових цих напруг при коефіцієнті спотворень синусоїдальності кривих напруги, який не перевищує 5%. Похибка розрахунків не перевищує 8%.

Використовуючи співвідношення складових зворотної послідовності для струмів і напруг при переході від схеми з'єднання «трикутник» до схеми «зірка», можна перетворити наближену формулу для напруги зворотної послідовності у формулу струму зворотної послідовності у фазах трипровідної мережі

$$I_{2i} = 1,074(I_{i \max} - I_{i \min}) \quad (11)$$

де $I_{i \max}$, $I_{i \min}$ - найбільше та найменше з трьох діючих значень фазних струмів в лінії i -ому спостереженні з урахуванням гармонічних складових цих струмів при коефіцієнті спотворень синусоїдальності кривих струму не більше 5%.

Таким чином, підставляючи (11) в (10), з урахуванням струму зворотної послідовності спрощено можна записати

$$k_I = \frac{\sqrt{6,19I_{\max}^2 - 5,19I_{\min}^2}}{I_n}$$

Додатково рекомендується обмежувати струм зворотної послідовності значенням $(0,2 \dots 0,25) I_n$ [8].

Мінімальний захист встановлюється на АД, які необхідно вимикати при пониженій напрузі для запобігання самозапуску відповідальних двигунів, а також АД, самозапуск яких при відновленні напруги неприпустимий за умовами безпеки або особливостей технологічного процесу [10].

Критична напруга $U_{кр}$ при якій двигуни, що працюють з номінальним навантаженням, перекидаються

$$U_{кр} \leq U_{ном} \sqrt{\frac{M_{ном}}{M_{мах}}},$$

де $M_{ном}$, $M_{мах}$ - номінальний і максимальний моменти АД.

Напруга спрацьовування захисту приймається такою, що дорівнює $U_{кр}$, витримка часу на відімкнення 0,5...1,5 с - для відповідальних двигунів, для інших АД - 10...15 с.

Висновок. Вдосконалено моделі та алгоритми захисту АД на основі його теплової моделі та контролю струмів обмотки статора, у яких враховано: всі нагрівачі втрати, у тому числі - втрати від несиметрії і несинусоїдальності напруги; струм зворотної послідовності через коефіцієнт кратності струму перевантаження; перевантажувальну характеристику діагностованого двигуна як часоструміву характеристику захисту.

Список літератури

1. Соркінд М. Асинхронные электродвигатели 0,4 кВ. Аварийные режимы работы / М. Соркінд // «Новости Электротехники», №2(32), 2005.
2. Сивокобыленко В.Ф. Тепловая защита асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при несимметрии питающего напряжения / В.Ф. Сивокобыленко, С.Н. Ткаченко // Вісник КДПУ ім. М. Остроградського. – 2009. – Вип. 3(56), ч.2. – С. 74-78.
3. Синчук О.Н. Тепловая модель кранового АД для диагностирования и настройки цифровой защиты от перегрузок / О.Н. Синчук, В.В. Чумак, С.Л. Михайлов // Электротехника, 2003. - №3. – С. 61-66.
4. Гимоян Г.Г. Релейная защита горных электроустановок / Г.Г. Гимоян. – изд. 2, перераб. и доп. М.: «Недра», 1978, 349 с.
5. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / И.А. Сыромятников Под ред. Л.Г. Мамикоянца. – 4-е изд., переработ. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 240 с., ил.
6. Корогодский В.И. Релейная защита электродвигателей напряжением выше 1 кВ / В.И. Корогодский, С.Л. Кужеков, Л.Б. Паперно – М.: Энергоатомиздат, 1987 – 248 с.
7. Коваленский И.В. Релейная защита электродвигателей высокого напряжения / И.В. Коваленский, - Л.: Энергия, 1964 – 81 с.
8. Сушко В. Защита низковольтных электродвигателей совершенных устройств / В. Сушко // «Новости Электротехники», №5(35), 2005.
9. Schneider Electric. Серия Sераm. Sераm1000+. Подстанция. Трансформатор. Двигатель. Сборные шины. Защита и контроль. – 2001.
10. Чернобровов Н.В. Релейная защита энергетических систем: Учеб. пособие для техникумов / Н.В. Чернобровов, Семенов В.А. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 800 с.: ил.

О. Zakladnyi, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., **ORCID** 0000-0003-2813-3692
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

ALGORITHMS OF PROTECTION OF ELECTRIC MOTORS BY MEANS OF MODERN SYSTEMS OF DIAGNOSTIC OF THEIR STATES

Traditional motor protection devices do not completely solve the problem of overload protection, damage to the power supply cable, distortion of phase currents associated with internal motor crashes, or deterioration of the insulation resistance of windings. requirements for reliable protection of the motor against overheating of the stator windings, caused by power supply asymmetry, damage to the cooling system and technological overloads, asymmetry air gap caused by wear of bearings, rotor jamming. The use of modern, reliable and effective protection against accidental operation modes can significantly reduce the number and frequency of accidents and lengthen

the lifespan of electric motors, reducing power consumption and losses from the suspension process. The principles of protection of electric motors with the help of modern systems of diagnostics of power and technical states of the electric drive using thermal model of the engine and control of stator current are considered in the article. The thermal model takes into account heating losses, including losses from asymmetry and non-sinusoidal voltage. The overload characteristic of an electric motor is taken as a temporary characteristic of protection, its initial mode before the occurrence of an emergency and the current of the reverse sequence are taken into account. The article presents the algorithms of current and thermal protection that can be applied in the development of modern systems of diagnostics of the condition of the drive.

Keywords: *electric drive, diagnosis system, thermal model, current protection, motor overload characteristic, protection algorithms.*

References

1. Sorkind M. Asynchronous motors 0.4 kV. Emergency operating modes / M. Sorkind // "Electrical Engineering News", №2 (32), 2005.
2. Sivokobylenko V.F. Thermal protection of an asynchronous motor with a short-circuited rotor with asymmetry of the supply voltage / V.F. Sivokobylenko, SN Tkachenko // Bulletin of the KSPU them. M. Ostrogradsky. - 2009. - No. 3 (56), part 2. - P. 74-78.
3. Sinchuk ON Thermal model of crane AD for the diagnosis and adjustment of digital overload protection / ON. Sinchuk, V.V. Chumak, S.L. Mikhailov // Electrical Engineering, 2003. - №3. - pp. 61-66.
4. Gimoyan GG Relay protection of mountain electrical installations / G.G. Himoyan. - ed. 2, rework. and ext. M.: Nedra, 1978, 349 p.
5. Syromyatnikov IA Modes of operation of asynchronous and synchronous motors / IA Syromyatnikov Ed. L.G. Mamikoyanets. - 4th ed., Reworking. and ext. - M.: Energoatomizdat, 1984. - 240 pp., III.
6. Korogodsky VI Relay protection of motors above 1 kV / VI Korogodsky, S.L. Kuzhekov, L.B. Paper - M.: Energoatomizdat, 1987 - 248 p.
7. Kovalensky IV Relay protection of high voltage electric motors / IV. Kovalensky, L.: Energy, 1964 - 81 p.
8. Sushko V. Protection of low-voltage electric motors of perfect devices / V. Sushko // «Electrical Engineering News», №5 (35), 2005.
9. Schneider Electric. Sepam series. Sepam1000+. Substation. Transformer. Engine. Precast tires. Protection and control. - 2001.
10. Chernobrov NV Relay protection of power systems: Textbook. manual for technical schools / NV Chernobrov, VA Semenov - M.: Energoatomizdat, 1998. - 800 p.: III.

УДК 62-83-52.003(082)

О.А. Закладной, канд. техн. наук, доцент, **ORCID 0000-0003-2813-3692**
Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

АЛГОРИТМЫ ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ СРЕДСТВАМИ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ ДИАГНОСТИКИ ИХ СОСТОЯНИЯ

Традиционные устройства защиты электродвигателей в полной мере не решают задач защиты от перегрузок, повреждений силового питающего кабеля, перекоса фазных токов, связанных с внутренними авариями двигателя или с ухудшением сопротивления изоляции обмоток. Рекомендации, изложенные в ПУЭ по защите электродвигателей, не учитывают современных требований по надежной защите двигателя от перегрева обмоток статора, обусловленного несимметрией напряжения питания, повреждением системы охлаждения и технологическими перегрузками, несимметрию воздушного зазора, вызванной износом подшипников, заклинивание ротора. Применение современного, надежного и эффективного защиты от аварийных режимов работы позволяет значительно сократить количество и частоту аварийных ситуаций и продлить срок службы электродвигателей, уменьшить расходы электроэнергии и потери от остановки технологического процесса. В статье рассмотрены принципы построения защиты электродвигателей с помощью современных систем диагностики энергетического и технического состояний электропривода с использованием тепловой модели двигателя и контроля тока статора. В тепловой модели учтены нагревательные потери, в том числе - потери от несимметрии и несинусоидальности напряжения. Как часоотсрочивающая характеристика защиты принимается перегрузочная характеристика электродвигателя, учитываются его начальный режим к возникновению аварийной ситуации и ток обратной последовательности. В статье представлены алгоритмы токовой

тепловой защиты, которые могут быть применены при разработке современных систем диагностики состояния электропривода.

Ключевые слова: электропривод, система диагностирования, тепловая модель, токовая защита, перегрузочная характеристика электродвигателя, алгоритмы защиты.

Надійшла 28.05.2019

Received 28.05.2019

УДК 621.331:621.311.4:621.3

В. М. Кутін д-р техн. наук, професор
Є. А. Бондаренко д-р техн. наук, доцент
М. В. Кутіна канд. техн. наук, доцент
Вінницький національний технічний університет

МЕТОД РИЗИК-АНАЛІЗУ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ТРАНСФОРМАТОРНИХ ПІДСТАНЦІЙ

В статті запропоновано метод ризик-аналізу для прогнозування технічного стану електрообладнання трансформаторних підстанцій. Розглянуто функціональну стратегію ризик менеджменту для подальшого вдосконалення експлуатації електрообладнання шляхом підвищення якості і ефективності системи технічного обслуговування і ремонту на основі виявлення областей ризику та їх оцінювання, запобігання виникнення небажаних наслідків шляхом прогнозування та оцінювання технічного стану електрообладнання для прийняття рішень.

Ключові слова: силове електрообладнання, технічна експлуатація, менеджмент, діагностика, ризик-аналіз

Вступ. Існуюча система технічного обслуговування і ремонту (СТОП) трансформаторних підстанцій складається з моніторингу технічного стану (ТС) електрообладнання, аналізу отриманих результатів ТС, проведення ремонтів - відновлення ресурсу електрообладнання, оцінювання матеріальних і фінансових витрат [1, 2, 3].

Найбільш поширеною формою проведення технічного обслуговування і ремонту (ТО і Р) є комплексний метод виконання робіт [2]. Цей метод базується на принципі сумісництва виконання робіт за місцем і часом, що дозволяє зменшити витрати часу на підготовчі заключні операції, переходи, переїзди, ефективніше використовувати засоби механізації, підвищити рівень керівництва роботами, їх виконання.

Для керування технічним станом роботи групуються в комплекси, які відрізняються за періодичністю і номенклатурою. У загальному випадку [4] елемент трансформаторної підстанції (ТП) відмовить і буде відновлений до моменту попереджувального відновлення з ймовірністю

$$Q(T_p) = \int_{T_{\min}}^{T_p} f(T) dT, \quad (1)$$

де $f(T)$ – щільність розподілу напрацювання на відмову; T_{\min} – мінімальний час напрацювання на відмову.

Середнє напрацювання на відмову за умови, що воно виникло до T визначають як

$$T' = \int_{T_{\min}}^{T_p} T \cdot f(T) dT / Q(T_p). \quad (2)$$

Середній використаний ресурс елемента ТП \bar{R} з урахуванням відновлення через відмови і попереджувальної заміни через напрацювання T_p

$$\bar{R} = \int_{T_{\min}}^{T_p} T \cdot f(T) dT + T_p (1 - Q(T_p)). \quad (3)$$

Якщо відсутні попередні втрати пов'язані з попереджувальним відновленням елемента, питомі витрати

$$C_{II} = \frac{(C_0 - C_p) Q(T_p) + C_p}{\bar{R}}, \quad (4)$$

де C_0 – рівень втрат від відмови елемента; C_p – втрати пов'язані з попереджувальним відновленням елемента.

Із виразів (2-4) видно, що зменшуючи T_p можна знизити імовірність відмови елемента, а збільшуючи T_p – збільшити середній використаний ресурс, тобто при застосуванні комплексного методу виконання робіт маємо два види втрат - відмова одних елементів і недовикористання ресурсів інших. Зменшити один вид витрат без одночасного збільшення іншого неможливо, з іншого боку присутня недосконалість планування. Недосконалість планування в сучасних умовах експлуатації і організації ремонтних робіт, зменшення витрат на проведення технічного обслуговування, використання запасних частин низької якості суттєво знизило ефективність планово-запобіжного ремонту електрообладнання ТП.

В зв'язку з цим на підприємствах електроенергетичної системи (ЕЕС) актуальним стає питання підвищення ефективності системи менеджменту та удосконалення внутрішнього контролю експлуатації електрообладнання.

Метою роботи є підвищення ефективності системи менеджменту експлуатації електрообладнання шляхом удосконалення методики та математичної моделі ризик-аналізу для проведення внутрішнього контролю стану силового електрообладнання підстанції електроенергетичної системи.

Результати дослідження. Ефективна система менеджменту експлуатації електрообладнання повинна забезпечувати: постійне усвідомлення й відстеження ймовірності і наслідків виникнення аварійних ситуацій (ризиків); формування і постійне оновлення методів оцінювання ризиків; розроблення рекомендацій щодо формування стратегії і ефективного розподілу ресурсів з урахуванням ступеня ризику; визначення межі ризику і своєчасне відображення величини ризиків у інформаційних системах.

Якісна і вартісна ідентифікація ризик-індикаторів повинна бути покладена в основу процесу аудиту та менеджменту експлуатації обладнання підстанцій. Інформаційний ризик можна визначити як агреговане поняття, що об'єднує технічні, технологічні, інформаційні ризики, які виникають в поточній операційній діяльності. Ризики можна розбити на такі [5, 6, 7]: техногенний, тобто такі фактори, які мають техногенне походження, джерелом якого є техніка і обладнання, що використовується у виробництві; ризик персоналу, пов'язаний з можливими помилками співробітників; ризик організаційної структури управління проявляється у додаткових фінансових затратах та організаційних труднощах у зв'язку з нечітким розподілом зон відповідальності між підрозділами підприємства.

Діагностика ризиків [6] – це комплексний аналіз параметрів технічного обслуговування та напрямків діяльності підприємства з метою ідентифікації, опису та класифікації ризиків. Методи діагностування ризиків базуються на статистичних спостереженнях, які є найбільш об'єктивними і точними. Виявлення ризиків є основою побудови системи ризик-менеджменту.

Процес менеджменту експлуатації обладнання підстанцій з урахуванням процесу ризику містить послідовність пов'язаних етапів управління: обміну інформацією між внутрішніми і зовнішніми учасниками цього процесу, ідентифікації та оцінювання ризиків, розроблення та впровадження керуючих рішень, вдосконалення менеджменту експлуатації обладнання підстанцій завдяки контролю за фактичним станом керованого процесу з урахуванням припустимого значення ризику. Процес управління починається з обміну інформацією з внутрішніми і зовнішніми учасниками цього процесу. Визначаються зовнішні і внутрішні параметри організації процесу ризик-менеджменту, критерії оцінки, розроблення та впровадження керуючих рішень методи аналізу. На етапі ідентифікації ризиків відбувається конкретизація ситуації ризику відносно досягнення поставленої мети. При аналізі ризиків визначається рівень ризику через ймовірність його виникнення та наслідки ситуації ризику, причини і фактори виникнення ризику, уточнюються і оцінюються моделі й методи оцінювання та контролю ризиків

Оцінювання ризиків здійснюється шляхом порівняння існуючого рівня ризику з припустимим значенням. Існуючий рівень ризику визначають з урахуванням співвідношення між потенційною вигодою і негативними наслідками ситуації з урахуванням характеру цього впливу. Далі відбувається розроблення

та впровадження керуючих рішень з метою збільшення потенційної вигоди і зниження потенційних витрат відносно ситуації ризику. Якщо не відбувається прийняття рішення щодо ризику, то процес повторюють після зміни вимоги до критерію оцінювання ризиків або їх структури і методів аналізу.

Оцінювання ризиків здійснюється шляхом порівняння існуючого рівня ризику з припустимим значенням. Існуючий рівень ризику визначають з урахуванням співвідношення між потенційною вигодою і негативними наслідками ситуації з урахуванням характеру цього впливу. Далі відбувається розроблення та впровадження керуючих рішень з метою збільшення потенційної вигоди і зниження потенційних витрат відносно ситуації ризику. Якщо не відбувається прийняття рішення щодо ризику, то процес повторюють після зміни вимоги до критерію оцінювання ризиків або їх структури і методів аналізу. Слід зауважити, що відстеження та аналіз ефективності процесу менеджменту з урахуванням ризиків необхідно проводити на кожній стадії процесу прийняття рішень.

Використовуючи основні принципи теорії ризиків [8], розробимо модель і методіку аналізу експлуатації силового електрообладнання. За функцію цілі приймемо якість експлуатації обладнання ТП. Функцію можна подати у вигляді вектора основних показників експлуатації

$$\bar{Z}(t) = (D_k(t), B_{\Sigma}(t), B_i(t), T_i(t)), \quad (5)$$

де $D_k(t)$ – результати діагностування ТС електрообладнання; $B_{\Sigma}(t)$ – загальна кількість відмов електрообладнання; $B_i(t)$ – кількість відмов i -того елемента електрообладнання; $T_i(t)$ – тривалість відмови i -того елемента електрообладнання.

Якість експлуатації залежить від умов експлуатації електрообладнання, які можна описати вектором, що характеризує умови експлуатації

$$X(t) = (A(t), P(t)), \quad (6)$$

де $A(t)$ – техніко-економічні показники роботи підстанції; $P(t)$ – вектор керованих впливів, що характеризує процес експлуатації обладнання ТП.

Результати статистичного аналізу експлуатації силового обладнання ТП показує стохастичний характер відмов обладнання [4], тому доцільно процес експлуатації обладнання ТП, розглядати як динамічний керований процес. При завданні управління станом обладнання ТП за прогнозованими параметрами необхідно оцінювати прогнозовані значення в умовах відомої інформації про фактичний стан обладнання $Z(t)$ і керовані впливи $P(t)$ які спрямовані на підтримку такого стану протягом часу t .

Формалізація задачі прогнозування стану обладнання ТП можна описати рівнянням у формі Ланжевена з адитивним білим шумом [4, 10]

$$\bar{Y} = f(y, u, t) + \xi(t), \quad (7)$$

де \bar{Y} – повна похідна вектора показників технічного стану обладнання ТП яка оцінює якість стану утримання обладнання ТП за час t ; f – векторна функція векторних аргументів, показників у технічного стану електрообладнання ТП і показників у управління технічним станом електрообладнання ТП; t – скалярний аргумент часу; $\xi(t)$ – випадковий процес білого шуму з нульовим математичним сподіванням.

Знаходження ТС зводиться до задачі ідентифікації, де на основі первинних даних про стан обладнання ТП і умов управління та експлуатації необхідно знайти векторну функцію f що належить деякому класу функцій, які допускають існування рішень у просторі станів у яких дана безперервна функція може бути вирішена.

Фактичні показники стану Z можуть бути визначені умовами експлуатації і обчислюватись через сукупність вхідних даних і в загальному випадку описуватись операторною формою зв'язку A_t з показниками експлуатаційної діяльності (X) в попередні моменти часу t_0 за період спостережень $t_0 \in T$ за виразом

$$Y(t) = A_t X(t_0). \quad (8)$$

Оцінювання та прогнозування показників ТС електрообладнання ТП можна здійснити в два етапи. Спочатку на основі рівняння (8) методами ідентифікації при спостереженні значень $y(t)$ і $x(t_0)$ оцінюється значення A_t^* , істинного оператора A_t . Потім знайдена оцінка оператора A_t^* і значень $X(t)$, що спостерігаються, дозволяє оцінити значення $Y^*(t)$ ТС електрообладнання ТП на підставі виразу

$$Y^*(t) = A_t^* X(t) \quad (9)$$

Для визначення класу функцій виразу (10) і вибору коректного методу ідентифікації та математичне

сподівання функції втрат між фактичним і оцінюваним ТС електрообладнання ТП накладається вимога близькості оцінки оператора A^* до істинного значення оператора A . При ідентифікації об'єктів управління, пошук оператора здійснюється за критерієм мінімуму середнього квадрата помилки, тобто

$$\varepsilon[Y_t, Y_t^*] = (Y_t - Y_t^*)^2. \quad (10)$$

Виходячи з (10) рівняння для визначення оптимальної з позиції мінімуму середнього квадрата помилки оцінки оператора A можна скористатися виразом

$$Y(t) = A^* X(t) = X \{Z(t) | X_{t_0}; t_0 \in T\}, \quad (11)$$

тобто оптимальним оператором, що описує стан електрообладнання ТП у першому наближенні можна вважати клас лінійних операторів.

В залежності від умов експлуатації $Z(t)$ та враховуючи процеси управління $P(t)$ станом електрообладнання ТП $Z(t)$ як об'єкта моделювання, може бути описано через оператор зв'язку A

$$Z(t) = A(X(t), P(t), \xi(t)). \quad (12)$$

Побудова моделі ТС електрообладнання ТП $Z^*(t) = A^*(X(t), P(t), \xi(t))$ зводиться до пошуку оцінювання оператора моделі електрообладнання ТП $Z^*(t)$, яка здійснюється методами параметричної ідентифікації [9, 10].

Параметри оператора моделі A^* знаходять на основі запису у вигляді багатовимірною рівняння регресії виду

$$Z_t^* = a_{m,t} X_{m,t} + a_{(m-1),t} X_{(m-1),t} + \dots + a_{0,t} + \xi_t, \quad (13)$$

де Z_t^* – оцінка дискретних значень вихідного показника в дискретні моменти часу t ; $X_{m,t}$ – дискретні значення експлуатаційних і керованих факторів, що використовуються при побудові моделі; $a_{m,t} \dots a_{0,t}$ параметри моделі, m – кількість використаних факторів в моделі.

Для забезпечення управління якістю електрообладнання ТП за прогнозованим станом, необхідно знати не тільки фактичні значення вектора показників стану електрообладнання $Z^* = [Z_1^*, Z_2^* \dots Z_k^*]$ у моменти часу $t = 1, 2, \dots, r$, що спостерігаються, але і їх прогнозовані значення.

Як метод прогнозування значень показників стану електрообладнання ТП і значень ризиків доцільно скористатись методом, який базується на побудові авторегресійної моделі однокрокової процедури прогнозування [11]

$$Z_{(t+1)} = \sum_{j=1}^r a_j Z_{t-j} + \xi_t, \quad (14)$$

де $Z_{(t+1)}$ – прогнозоване значення показника; a_j – коефіцієнт рівняння авторегресії $j = 0, 1, 2, \dots, r$; ξ_t – значення шуму апроксимації $Z_{(t+1)}$ авторегресії кінцевої довжини.

Функціональна схема запропонованої математичної моделі ризик-аналізу та прогнозування технічного стану наведена на рис. 1

Вхідні дані моделі $\bar{Z}(t)$, надходять у вигляді вектора динамічних показників умов експлуатації з інформаційних систем аналізу та оцінювання параметрів технічного стану видів обладнання ТП автоматизованою інтелектуальною системою. Діагностичні параметри визначаються за двома основними вимогами: параметр служить індикатором працездатності обладнання і може бути відновлений до вихідного значення в результаті проведення ТОР.

Вихід схеми об'єкта ризик-моделювання $Z(t)$ характеризує фактичний стан якості експлуатації електрообладнання ТП, і визначається виразом (1) і надходить з інформаційних систем.

Вихід $Z^*(t)$ характеризується вектором оцінювання показників

$$Z^*(t) = D_k(t), B(t), B_i(t), T_i(t) + \Delta W(t). \quad (15)$$

Як інтегральний показник збитку по ТП прийнято $\Delta W(t)$ недовипуск електроенергії.

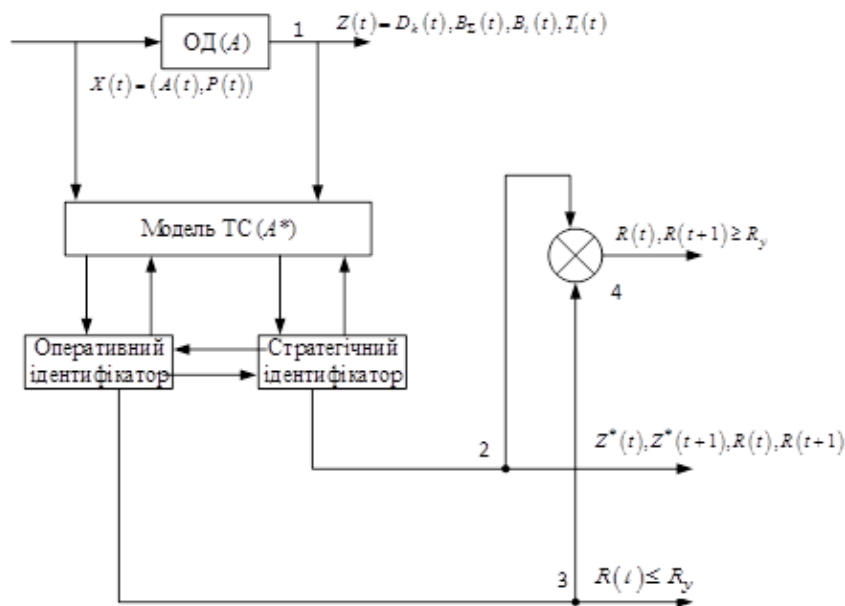


Рисунок 1 – Структурна схема ризик-аналізу та прогнозування ТС електрообладнання

Оцінка $Z^*(t)$ на відміну від $Z(t)$ визначається статистичною формулою показників ТС електрообладнання ТП. Показник $Z(t+1)$ вектор прогнозованих значень за один період спостережень вперед, який визначається методом аналітичного прогнозування. На цьому виході моделі ще формуються оцінки обчислювальних ризиків ТС електрообладнання ТП $R(t)$ та прогноз ризиків $R(t+1)$. Це дозволяє здійснити комплексну оцінку ТС електрообладнання ТП як

$$k(t) = F(R_n(t), P(t)) + \xi_n, \quad (16)$$

де F – функціонал від найбільш ймовірних значень факторів; ξ_n – найбільш ймовірна помилка $\xi_n(t)$ ризику R_n .

На третьому виході (рис. 1) моделі формуються обчислювальні нормативно допустимі верхні R_{dv} та нижні R_{dn} межі діапазонів цільових ризиків R_y в рамках обраної довірчої ймовірності. На четвертому (рис. 1) виході моделі аналізується виконання цільових показників ризику R_y у зіставленні з поточним фактичним ТС ризику $R(t)$. Коли $R(t) \leq R_y$, то виявляють причини відхилень, виконуються обслуговування та ремонт електрообладнання ТП на вимогу і за прогнозованим ТС.

Висновок

Запропонований метод ризик-аналізу електрообладнання трансформаторної підстанції забезпечує оцінювання якості його обслуговування завдяки прийняттю стратегії обслуговування основаної на порівнянні поточних і цільових показників ризиків порушень та їх наслідків. Аналіз ризиків експлуатації електрообладнання дозволяє дати оцінку ефективності і контролювати реалізацію управлінських рішень, спрямованих на вдосконалення правил експлуатації і СТОР електрообладнання ТП.

Список використаної літератури

1. Технічна експлуатація електричних станцій і мереж. Правила. – К. : Об'єднання енергетичних підприємств «Галуzeвий резервно-інвестиційний фонд розвитку енергетики», 2003. – 329 с.
2. Справочник по ремонту и техническому обслуживанию электрических сетей / под ред. К. Антипова, И. Е. Бандуилова. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 560 с.
3. Синягин Н. Н. Система планово-предупредительного ремонта оборудования и сетей промышленной энергетики / Синягин Н. Н., Афанасьев Н. А., Новиков С. А. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 448 с.
4. Кутин В. М. Выбор стратегии ремонтно-обслуживающих действий системы электроснабжения промышленности и агропромышленного комплекса / В. М. Кутин // Энергетика и электрификация. – 2003. – № 9. – С. 47 - 51.
5. Алехин Е. И. Теория риска и моделирования рискованных ситуаций [Текст] / Е. И. Алехин – Орел: Изд-во ОГУ, 2008 – 152с.

6. Матусевич О. О. Математична модель ризик-аналізу технічного стану силового обладнання тягових підстанцій [Текст] / О. О. Матусевич, Д. В. Міронов // Гірнична електромеханіка та автоматика: Наук. – техн. зб. – 2015 – Вип. 93 – С. 48 – 50.

7. Бондаренко Є. А. Оцінювання ризику електротравматизму методом пробіт-аналізу для менеджменту з електробезпеки / Є. А. Бондаренко, В. М. Кутін // НТУУ «КПІ». "ЕНЕРГЕТИКА: економіка, технології, екологія". – 2015. – № 3 (41). – С. 69-72.

8. Галкин А. Г. Теоретические принципы построения модели риск-анализа процессов содержания объектов инфраструктуры ОАО «РЖД» [Текст] / А. Г. Галкин, С. А. Митрофанов // Изд. Академии управления: теория, стратегия инновации : теоретический и научно-методический журнал – Самара, Изво «Самарский муниципальный институт управления», 2011 – №3(4) – С. 29-39.

9. Семенычев В. К. Информационные системы в экономике. Эконометрическое моделирование инноваций. Ч. 1: учебн. пособие / В. К. Семенычев, Е. В. Семенычев, – Самара: Изд-во Самара гос. аэрокосм. Ун-та, 2006 – 217с.

10. Эйкхофф П. Основы идентификации систем управления. Оценка параметров и состояний [Текст] / П. Эйкхофф – Москва: Мир, 1975 – 680с.

11. Кутін В. М. Діагностика електрообладнання: навчальний посібник/ В. М. Кутін, М. О. Люхін, М. В. Кутіна – Вінниця: ВНТУ, 2014 –161с.

V. Kutin, Dr. Eng. Sc., Prof.

Y. Bondarenko, Dr. Eng. Sc., Assoc. Prof.

M. Kutina, PhD in Technical Sciences, Assoc. Prof.

**State Institution of Higher Education
«Vinnitsa National Technical University»**

RISK ANALYSIS METHOD FOR FORECASTING THE TECHNICAL CONDITION OF ELECTRICAL EQUIPMENT OF TRANSFORMER SUBSTATIONS

In the work it is shown that today there is a significant reduction of the efficiency of the system of planned and preventive repair of electric equipment of electric power systems due to imperfection of planning and organization of repair works, reduction of maintenance costs, lack of quality spare. Therefore, the issue of development and introduction of modern methods and methods for increasing the efficiency of the system of internal control and risk management of electrical equipment electrical energy systems becomes actual.

Taking into account the risk management process, the method of risk analysis and forecasting of the technical condition of electrical equipment of transformer substations is proposed. The functional strategy of risk management for the further improvement of the operation of electrical equipment in order to improve the quality and efficiency of the maintenance and repair system based on the identification of risk areas and their assessment, prevention of risks through the forecasting and evaluation of the technical state of electrical equipment for decision making

Keywords: *power electrical equipment, technical operation, diagnostics, management, risk analysis.*

1. Technical operation of power plants and networks. Rules. – Kyiv, Union of Energy Enterprises "Industry Reserve and Investment Fund for Energy Development", 2003, 329 p. (Ukr).

2. Antipov K., Banduilova I., Directory of repair and maintenance of electrical networks. – Moskov, Energoatomizdat, 1987, 560 p. (Rus).

3. Sinyagin N. N., Aphonasev N. A, Novikov S. A. System of planned-preventive repair of equipment and networks of industrial energy. – Moskov, Energoatomizdat, 1984, 448 p. (Rus).

4. Kutin V. M. Choice of strategy of repair and maintenance actions of power supply systems of industry and agro-industrial complex./ Energetika i elektrifikaciya, 2003, Vol. 9, P. 47 – 51 (Rus).

5. Alekhin E. I. Risk Theory and Risk Modeling [Text]. – Oryol, izd-vo OGU, 2008, 152 p. (Rus).

6. Matusevich O. O., Mironov D. V. Mathematical model of risk-analysis of the technical camp of power possession of traction power [Text]. Hirnycha elektromekhanika ta avtomatyka, 2015, Vol. 93, P. 48 – 50 (Ukr).

7. Bondarenko E. A., Kutin V. M. Estimation of electro-traumatic risk by probit analysis for electrical safety management./ "ENERHETYKA: ekonomika, tekhnolohiyi, ekolohiya. – Kyiv: NTTU "KPI", 2015, Vol. 3, P. 69-72 (Ukr).

8. Galkin A. G. Mitrophanov S. A. Theoretical principles of construction of the model of risk-analysis of processes of maintenance of infrastructure objects of OJSC "Russian Railways" [Text]/ Izd-vo Academies of Management: Theory, Strategy of Innovation: Theoretical and Scientific and Methodological Journal – Samara, Izd-vo "Samara Municipal Institute of Management", 2011, Vol. 4, P. 29-39 (Rus).

9. Semenychev V. K., Semenyche E. V Information systems in the economy. Econometric modeling of innovation. Part 1: textbook. Allowance. – Samara: Izd-vo Samara gos. Aerokosmos, 2006, 217p. (Rus).

10. Eikhoff P. Fundamentals of identification of control systems. Estimation of parameters and states [Text]. – Moskov: Mir, 1975, 680p (Rus).

11. Kutin V.M. Ilyuxin M. O., Kutina M. V. Electrical diagnostics: initial installation. – Vinnitsa: VNTU, 2014, 161p. (Ukr).

УДК 621.331:621.311.4:621.3

В. М. Кутин, д-р техн. наук, проф.

Е. А. Бондаренко, д-р техн. наук, доц.

М. В. Кутина, канд. техн. наук, доц.

Винницький національний технічний університет

МЕТОД РИСК-АНАЛИЗА ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ТРАНСФОРМАТОРНЫХ ПОДСТАНЦИЙ

В работе показано, что сегодня происходит существенное снижение эффективности использования системы планово-предупредительного ремонта электрооборудования электроэнергетических систем, это обусловлено несовершенством планирования и организации ремонтных работ, уменьшение затрат на проведение технического обслуживания, отсутствием качественных запасных. Поэтому актуальным становится вопрос разработки и внедрения современных методов и способов повышения эффективности системы внутреннего контроля и менеджмента эксплуатации электрооборудования электроэнергетических систем. Учитывая процесс риск менеджмента в статье предложен метод риск-анализа и прогнозирования технического состояния электрооборудования трансформаторных подстанций. Рассмотрена функциональная стратегия риск менеджмента для дальнейшего совершенствования эксплуатации электрооборудования с целью повышения качества и эффективности системы технического обслуживания и ремонта на основе выявления областей риска и их оценки, предотвращение возникновения рисков путем прогнозирования и оценки технического состояния электрооборудования для принятия решений.

Ключевые слова: *силовое электрооборудование, техническая эксплуатация, диагностика, менеджмент, риск-анализ.*

Надійшла 29.08.2019

Received 29.08.2019

УДК 681.51

О.А. Жученко, канд. техн. наук, доц. ORCID 0000-0001-5611-6529

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

КЕРУВАННЯ ЦИКЛІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ В УМОВАХ ДИСКРЕТНОГО ПРОСТОРОВО-ЧАСОВОГО ЗАВДАННЯ

У багатьох галузях промисловості існують технологічні процеси, які мають циклічний характер. При керуванні такими процесами високу ефективність продемонстрував метод керування з ітеративним навчанням (КІН). Стаття представляє нову модифікацію метода керування з ітеративним навчанням (КІН) в умовах, коли завдання системи задається сукупністю значень вихідних змінних у певних точках у

© О.А. Жученко, 2019

певні дискретні моменти часу. Така постановка задачі викликає потребу побудови траєкторії руху системи через задані точки. У даній статті пропонується метод, який забезпечує проходження системи через задані точки у заданий час без побудови траєкторії завдання. Даний метод передбачає формування сигналів керування, використовуючи КІН-алгоритм. Це дозволяє спростити розрахунки та підвищити якість роботи системи. Даний метод розглядається як для неперервних, так і для дискретних систем. Запропонований алгоритм керування з ітеративним навчанням забезпечує відслідковування заданих вихідних змінних з достатньою точністю при високій збіжності алгоритму. Одночасно даний алгоритм відрізняється простотою і не вимагає попередньої побудови траєкторії руху системи.

Ключові слова: керування, ітеративне навчання, алгоритм керування, циклічні процеси, неперервні системи, дискретні системи.

Вступ

Зазвичай для забезпечення проходження вихідних змінних через задані точки синтез системи керування здійснюється у два етапи [1, 2]: побудова траєкторії руху та розрахунок сигналів керування. Задана траєкторія руху системи формується на основі інформації про значення вихідних змінних у заданих точках. При цьому, як правило, використовуються методи інтерполяції [1, 5]. Далі для відслідковування відомої траєкторії руху використовуються різні методи керування, наприклад, ПІД-керування, адаптивне керування, керування з ітеративним навчанням.

У багатьох галузях промисловості існують технологічні процеси, які мають циклічний характер. При керуванні такими процесами високу ефективність продемонстрував метод керування з ітеративним навчанням (КІН) [3, 4]. КІН-алгоритм використовує інформацію про процеси керування на попередньому циклі роботи для їх покращення на наступних циклах з метою максимального наближення вихідних змінних до заданих значень.

Аналіз попередніх досліджень

Відомі публікації [6-8] свідчать про те, що КІН-алгоритм забезпечує збіжність вихідних змінних до заданої траєкторії руху, використовуючи ітеративну процедуру. На відміну від стандартної КІН-процедури у випадку, коли не задана траєкторія руху, а задані тільки окремі точки, через які повинна рухатися система, сигнали керування такої системи (КІНТ-керування з ітеративним навчанням для забезпечення руху системи через задані точки) повинні забезпечити виконання поставленої задачі.

У працях [9-12] показана ефективність використання КІН-алгоритму для забезпечення проходження системи тільки через одну задану точку.

Відомі дослідження [13-15], у яких задача керування розв'язується для декількох точок. Так, у праці [13] розроблений КІНТ-алгоритм, синтез якого здійснюється у частотній області. Автори праці [14] досліджують методи інтерполяції для побудови траєкторії руху. У [15] запропонований КІНТ-алгоритм, але якість керування при його застосуванні залежить від часу квантування. КІНТ-алгоритм досліджується і у праці [16], але тільки по відношенню до систем з одним входом та одним виходом.

Мета та завдання

На підставі наведеного вище аналізу можна зробити висновок, що більшість опублікованих досліджень для забезпечення проходження системи керування через усі задані точки передбачає попереднє формування траєкторії руху. Однак, розв'язання КІНТ-задачі у два етапи (синтез траєкторії, синтез керування) має певні недоліки. По – перше, використання існуючих алгоритмів синтезу траєкторії руху системи не забезпечує оптимальність цих траєкторій. По – друге, КІН-теорія [6, 7] свідчить про те, що якість керування та швидкість збіжності алгоритму залежить як від динаміки системи, так і від траєкторії руху. Це означає, що навіть в умовах реалізації оптимальної траєкторії руху КІН-алгоритм може давати незадовільні результати. По – третє, можливі похибки як при синтезі траєкторії, так і при синтезі керування можуть призвести до незадовільної якості роботи системи керування у зв'язку з тим, що використовуються непрямі методи синтезу. Названі причини обумовлюють необхідність розроблення методу, який об'єднував би обидва етапи синтезу в один КІНТ-алгоритм.

Таким чином, метою даної статті є створення методу керування (КІНТ-алгоритм) циклічними процесами при умові, що система керування ними повинна відслідковувати задані значення вихідних змінних у певні дискретні моменти часу без попередньої побудови траєкторії руху.

Керування з інтерактивним навчанням для заданих вихідних змінних

Згідно з постановкою задачі керування вихідні змінні системи задані у певні дискретні моменти часу t_1, t_2, \dots, t_M , де $0 \leq t_1 < t_2 < \dots < t_M \leq T$ і дорівнюють $y_{зад}(t_1), y_{зад}(t_2), \dots, y_{зад}(t_M)$.

Завдання системи керування полягає у тому, щоб забезпечити її проходження через задані точки. При синтезі неперервної системи керування має бути побудована траєкторія завдання y_z , яка проходить

через задані точки у моменти часу t_1, t_2, \dots, t_M . Зазначимо, що дана траєкторія обирається відповідно до оптимальної стратегії, наприклад, мінімізація загального часу проходження. Далі, використовуючи математичну модель процесу, синтезується регулятор для забезпечення відслідковування заданої траєкторії. Стандартним рішенням у цьому випадку є використання ПД – регулятора та зворотного зв'язку для формування сигналів керування $u(t)$.

Для циклічних процесів, які працюють на інтервалі часу $[0, T]$, доцільно використовувати метод керування з ітеративним навчанням, який має забезпечити відслідковування заданої траєкторії y_z . У цьому випадку КІН-алгоритм використовує похибки вихідних сигналів та сигналів керування на попередньому циклі роботи для коригування сигналів керування на наступному циклі:

$$u_{k+1} = T_u u_k + T_e e_k,$$

де похибка вихідної змінної e_k на k -й ітерації розраховується як $e_k = y_z - u_k$.

Для лінійних стаціонарних об'єктів $y_k = T_s u_k$ алгоритм керування забезпечує збіжність похибки $\lim_{k \rightarrow \infty} e_k = e^*$, якщо $\rho(T_u - T_e T_s) < 1$, де $\rho(A)$ спектральний радіус матриці A [17].

Як сказано вище, зазвичай КІН-алгоритм синтезується, використовуючи задану траєкторію руху y_z . На відміну від цього у даному випадку пропонується КІН-алгоритм, який будується безпосередньо на значеннях вихідних змінних у певні моменти часу $y_{зад}(t_1), y_{зад}(t_2), \dots, y_{зад}(t_M)$. При цьому використовується такий критерій якості

$$J = \sum_{i=1}^m \|e_{k+1}(t_i)\|_{q_i} + \|u_{k+1} - u_k\|_R + \|u_{k+1}\|_S,$$

де $e_k(t_i)$ - похибки керування у час t_i для $k - i$ ітерації, тобто $e_k(t_i) = y_{зад}(t_i) - u_k(t_i)$.

У даному критерії якості враховуються похибки керування, сигнали керування та швидкості змін останніх.

КІНТ – алгоритм для неперервних систем

Розглядається лінійна стаціонарна одновимірна система, яка математично описується у просторі станів

$$\begin{aligned} \dot{x}_k(t) &= Ax_k(t) + Bu_k(t) \\ y_k(t) &= Cx_k(t) \end{aligned} \quad (1)$$

де k - номер ітерації, а матриці A, B та C мають відповідні вимірності. Передбачається, що система є керованою та спостережуваною.

Завдання системи керування полягає у тому, щоб, використовуючи КІН-алгоритм, забезпечити проходження вихідної змінної через задані точки у певні моменти часу на кожному циклі роботи. Значення вихідної змінної може бути розраховано за відомою формулою [17]

$$y_k(t_i) = Ce^{At_i} x_k(0) + C \int_0^{t_i} e^{A(t_i-t)} Bu_k(t) dt.$$

Тоді похибка керування буде

$$e_k(t_i) = y_{зад}(t_i) - Ce^{At_i} x_k(0) - C \int_0^{t_i} e^{A(t_i-t)} Bu_k(t) dt.$$

Вважаючи, що початковий стан $x_k(0) = 0$, а також вводячи

$$p_i(t) = \begin{cases} Ce^{A(t_i-t)} B & \text{якщо } t \leq t_i \\ 0 & \text{якщо } t > t_i \end{cases},$$

перепишемо похибку керування у вигляді $e_k(t_i) = y_{зад}(t_i) - \int_0^{t_i} p_i(t) u_k(t) dt$.

Позначимо вектори

$$\mathbf{y}_{зад} = \left[y_{зад}^T(t_1) \quad y_{зад}^T(t_2) \quad \dots \quad y_{зад}^T(t_M) \right]^T,$$

$$\mathbf{e}_k = \left[e_k^T(t_1) \quad e_k^T(t_2) \quad \dots \quad e_k^T(t_M) \right]^T,$$

$$\mathbf{P}(t) = \left[p_1^T(t) \quad p_2^T(t) \quad \dots \quad p_M^T(t) \right]^T.$$

Тоді

$$e_{k+1} = y_{зад} - \int_0^T P(t)u_{k+1}(t)dt$$

Розглянемо наступний критерій якості

$$J = \sum_{i=1}^M e_{k+1}^T(t_i) \mathbf{q}_i e_{k+1}(t_i) + \int_0^T u_{k+1}^T(t) \mathbf{S} u_{k+1}(t) dt + \int_0^T (u_{k+1}(t) - u_k(t))^T \mathbf{R} (u_{k+1}(t) - u_k(t)) dt \quad (2)$$

де $\mathbf{R} = r\mathbf{I}$ та $\mathbf{S} = s\mathbf{I}$ – діагональні додатно визначені матриці; \mathbf{q}_i – вагова матриця для похибки керування у час t_i .

Критерій якості (2) можна записати таким чином

$$J = \mathbf{e}_{k+1}^T \mathbf{Q} \mathbf{e}_{k+1} + \int_0^T u_{k+1}^T(t) \mathbf{S} u_{k+1}(t) dt + \int_0^T (u_{k+1}(t) - u_k(t))^T \mathbf{R} (u_{k+1}(t) - u_k(t)) dt$$

де \mathbf{Q} – симетрична додатно визначена вагова матриця.

Для розрахунку оптимального керування на $(k+1)$ – й ітерації потрібно продиференціювати J по $u_{k+1}(t)$:

$$-\mathbf{P}^T(t) \mathbf{Q} (y_{зад} - \int_0^T \mathbf{P}(t) u_{k+1}(t) dt) + (\mathbf{R} + \mathbf{S}) u_{k+1}(t) = \mathbf{R} u_k(t). \quad (3)$$

Введемо нову змінну z_k таку, що

$$u_k(t) = \mathbf{P}^T(t) z_k \quad (4)$$

З урахуванням (3) останній вираз набуває вигляду

$$-\mathbf{P}^T(t) \mathbf{Q} (y_{зад} - \int_0^T \mathbf{P}(t) \mathbf{P}^T(t) z_{k+1} dt) + (\mathbf{R} + \mathbf{S}) \mathbf{P}^T(t) z_{k+1} = \mathbf{R} \mathbf{P}^T(t) z_k.$$

Підставляючи $\mathbf{R} = r\mathbf{I}$ та $\mathbf{S} = s\mathbf{I}$, дістаємо

$$((r+s)\mathbf{I} + \mathbf{Q} \int_0^T \mathbf{P}(t) \mathbf{P}^T(t) dt) z_{k+1} = r z_k + \mathbf{Q} y_d. \quad (5)$$

Новий алгоритм побудований на векторі z_k і керуючі змінні визначаються з послідовності z_k на кожній ітерації.

Введемо симетричну додатно визначену матрицю

$$\mathbf{W} = \int_0^T \mathbf{P}(t) \mathbf{P}^T(t) dt,$$

тоді (5) перепишемо таким чином

$$((r+s)\mathbf{I} + \mathbf{Q} \mathbf{W}) z_{k+1} = (r\mathbf{I} + \mathbf{Q} \mathbf{W}) z_k + \mathbf{Q} \varepsilon_k, \quad (6)$$

$$\text{де } \varepsilon_k = y_{зад} - \mathbf{W} z_k.$$

Звідси послідовність z_k розраховується із формули

$$z_{k+1} = \mathbf{T}_z z_k + \mathbf{T}_e \varepsilon_k,$$

де

$$\mathbf{T}_z = ((r+s)\mathbf{I} + \mathbf{Q} \mathbf{W})^{-1} (r\mathbf{I} + \mathbf{Q} \mathbf{W}),$$

$$T_e = ((r+s)\mathbf{I} + \mathbf{QW})^{-1}\mathbf{Q},$$

де u_k визначаються виразом (4).

Збіжність даного алгоритму забезпечується при умові [15]

$$\rho(\mathbf{T}_z - \mathbf{T}_e \mathbf{W}) < 1,$$

де

$$\mathbf{T}_z - \mathbf{T}_e \mathbf{W} = [(r+s)\mathbf{I} + \mathbf{QW}]^{-1} r,$$

де ρ - спектральний радіус матриці.

Крім того, якщо $\mathbf{Q} = q\mathbf{I}$, де q - дійсне додатне число, КІНТ-алгоритм має монотонну збіжність. Це впливає з того, що матриця $[(r+s)\mathbf{I} + \mathbf{QW}]^{-1} r$ є симетричною додатно визначеною матрицею, що має найбільше сингулярне значення, яке дорівнює її спектральному радіусу та при цьому $\rho(((r+s)\mathbf{I} + \mathbf{QW})^{-1} r) < 1$ [15].

Отже, для лінійної неперервної системи (1) наступний КІНТ-алгоритм

$$u_k(t) = \mathbf{P}^T(t)z_k,$$

$$z_{k+1} = \mathbf{T}_z z_k + \mathbf{T}_e \varepsilon_k$$

забезпечує відслідковування заданих значень вихідної змінної у певні моменти часу.

Якість керування можна характеризувати усталеною похибкою керування ε_∞ . Для її розрахунку спочатку визначимо з (5) значення z_k при $k \rightarrow \infty$: $[(r+s)\mathbf{I} + \mathbf{QW}]z_\infty = rz_\infty + \mathbf{Q}y_{зад}$,

або

$$z_\infty = (s\mathbf{I} + \mathbf{QW})^{-1}\mathbf{Q}y_{зад}.$$

Тоді

$$\varepsilon_\infty = y_{зад} - \int_0^T P(t)u_\infty(t)dt = y_{зад} - \mathbf{W}(s\mathbf{I} + \mathbf{QW})^{-1}\mathbf{Q}y_{зад} \quad (7)$$

З виразу (7) видно, що усталена похибка не залежить від матриці \mathbf{R} , тобто якість керування та швидкість збіжності КІНТ-алгоритму не зв'язані між собою.

На практиці, як правило, існує ситуація, коли важливість відслідковування значень вихідних змінних у різних точках різна. Ця обставина може бути врахована, задаючи різні значення елементів матриці \mathbf{Q} .

КІНТ – алгоритм для дискретних систем.

Розглянемо лінійну стаціонарну дискретну систему

$$x_k(t+1) = Ax_k(t) + Bu_k(t), \quad (8)$$

$$y_k(t) = Cx_k(t),$$

де $x_k(t) \in \mathbb{R}^p$, $u_k(t) \in \mathbb{R}^m$ та $y_k(t) \in \mathbb{R}^n$ (k - номер ітерації). Система працює на пролязі інтервалу часу $t = 0, 1, 2, \dots, N-1$ та матриці A, B та C мають відповідну вимірність.

На k -й ітерації вихідна змінна системи у i -й момент часу розраховується за формулою [14]

$$y_k(t_i) = CA^{t_i}x_k(0) + C \sum_{j=0}^{t_i-1} A^{t_i-j-1} Bu_k(j).$$

Якщо прийняти $x_k(0) = 0$, похибки керування визначаються таким чином

$$\varepsilon_k(t_i) = y_{зад}(t_i) - C \sum_{j=0}^{t_i-1} A^{t_i-j-1} Bu_k(j).$$

Сформуємо вектор керування з послідовності N керувань у кожний момент часу $u_k = [u_k^T(0) \quad u_k^T(1) \quad \dots \quad u_k^T(N-1)]^T$ та введемо

$$g_i(t) = \begin{cases} CA^{t-t-1}B & t < t_i \\ 0 & t \geq t_i \end{cases},$$

Тоді вихідну змінну в i -й момент часу можна виразити як

$$y_k(t_i) = \sum_{t=0}^{N-1} g_i(t)u_k(t) = g_i^T u_k,$$

де g_i визначається так $g_i = [g_i(0) \quad g_i(1) \quad \dots \quad g_i(N-1)]^T$.

Критерій якості відслідковування заданих значень вихідної змінної у певні моменти часу представимо виразом

$$J = \sum_{i=1}^M (y_{зад}(t_i) - g_i^T u_{k+1})^T Q_i (y_{зад}(t_i) - g_i^T u_{k+1}) + u_{k+1}^T S u_{k+1} + (u_{k+1} - u_k)^T R (u_{k+1} - u_k), \quad (9)$$

де $R = rI$, $S = sI$, Q_i - додатно визначені діагональні матриці.

Подібно наведеному вище позначимо

$$y_{зад} = [y_{зад}^T(t_1) \quad y_{зад}^T(t_2) \quad \dots \quad y_{зад}^T(t_M)]^T$$

$$G = [g_1^T \quad g_2^T \quad \dots \quad g_M^T]^T.$$

Тепер критерій якості (9) може бути переписаний у вигляді

$$J = (y_{зад} - G u_{k+1})^T Q (y_{зад} - G u_{k+1}) + u_{k+1}^T S u_{k+1} + (u_{k+1} - u_k)^T R (u_{k+1} - u_k). \quad (10)$$

Керуючі змінні на $(k+1)$ -й ітерації визначаються з умови $\delta J / \delta u_{k+1} = 0$ або

$$-G^T Q (y_{зад} - G u_{k+1}) + R (u_{k+1} - u_k) + S u_{k+1} = 0 \quad (11)$$

Приймаючи $u_k = G^T z_k$, рівняння (11) запишеться так:

$$-Q (y_{зад} - G G^T z_{k+1}) + r (z_{k+1} - z_k) + s z_{k+1} = 0 \quad (12)$$

Отже, КІНТ-алгоритм має вигляд

$$((r+s)I + QW_D) z_{k+1} = (rI + QW_D) z_k + Q \varepsilon_k, \quad (13)$$

де $W_D = G G^T$ - симетрична додатно визначена матриця.

Матриця $[(r+s)I + QW_D]$ є додатно визначеною. Тоді, позначаючи

$$L_z = ((r+s)I + QW_D)^{-1} (rI + QW_D),$$

$$L_e = ((r+s)I + QW_D)^{-1} Q,$$

а також, використовуючи (13), КІНТ-алгоритм для дискретних систем виглядає таким чином:

$$u_k = G^T z_k$$

$$z_{k+1} = L_z z_k + L_e \varepsilon_k$$

Даний алгоритм забезпечує відслідковування заданих значень вихідної змінної у певні моменти часу. При цьому сигнал керування прямує при $k \rightarrow \infty$ до фіксованого значення u_∞

$$u_\infty = G^T (sI + QW_D)^{-1} Q y_{зад},$$

а похибка ε_∞ визначається формулою

$$\varepsilon_\infty = y_{зад} - W_D (sI + QW_D)^{-1} Q y_{зад}.$$

Треба зазначити, що у випадку дискретної системи спостерігається суттєве зменшення обчислювальних розрахунків. У дискретному КІНТ-алгоритмі вектор $z_k \in \mathbb{R}^M$ і L_z та L_e - матриці вимірністю $mM \times mM$, де M - кількість заданих точок. Для порівняння неперервний КІНТ-алгоритм для розрахунку керуючих змінних використовує матрицю вимірністю $mN \times mN$. Коли тривалість ітерації

значна ($N > 1000$), що є звичайним для багатьох практичних випадків, вимоги до об'єму пам'яті та часу розрахунку катастрофічно зростають.

Імітаційне моделювання.

Розглянемо неперервну систему, яка описується рівняннями

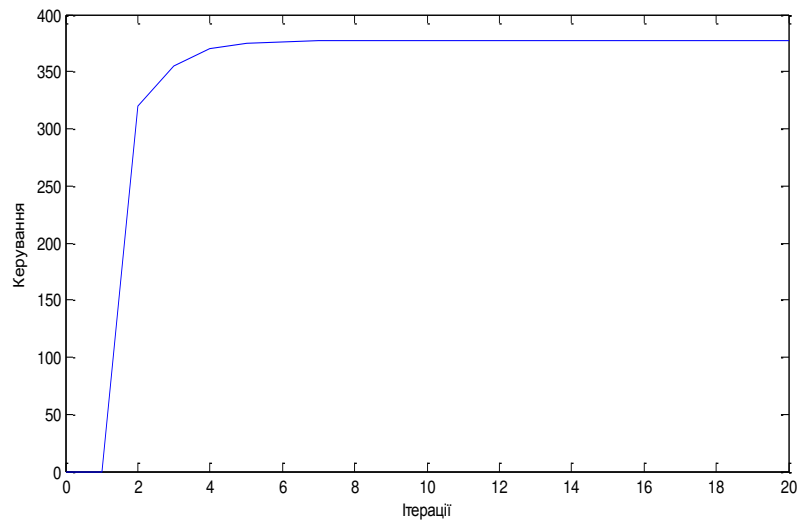
$$\dot{x} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -0.2 & -0.3 & -1 \end{pmatrix} x + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} u$$

$$y = (0 \ 0 \ 0.1)x$$

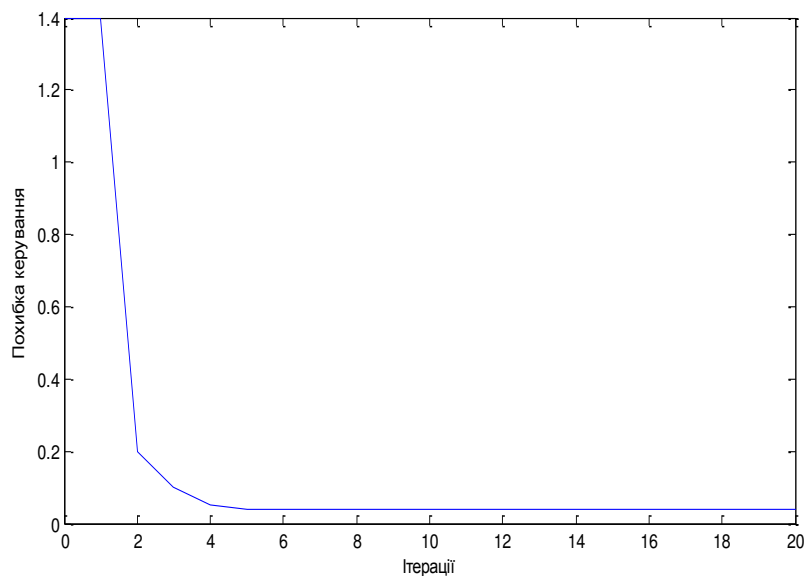
і діє на інтервалі $t \in [0,1]$. Виберемо 10 точок з цього інтервалу як завдання.

Нехай вагові матриці будуть $\mathbf{Q} = 5\mathbf{I}$, $\mathbf{R} = 5 \cdot 10^{-3}\mathbf{I}$, $\mathbf{S} = 10^{-3}\mathbf{I}$.

Результати моделювання, представлені рис.1, демонструють швидку збіжність сигналу керування та похибки керування на протязі декількох ітерацій. Це свідчить про те, що можна досягти якісного керування без розрахунку траєкторії сигналу завдання.



а)



б)

Рис.1. Графіки зміни керування (а) та похибки керування (б)

На рис.2 показані зміни виходу системи на різних ітераціях. Як видно з рисунку, після 20 ітерацій вихідні змінні достатньо близько проходять біля заданих точок.

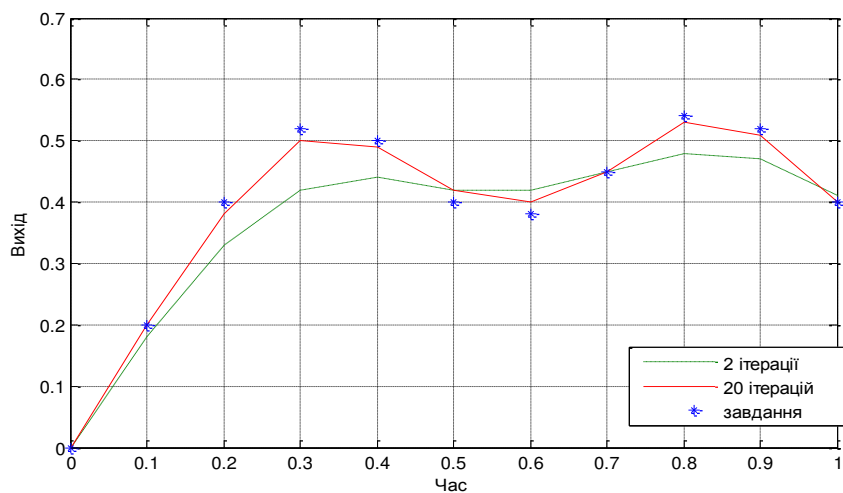


Рис. 2. Вихідні змінні при $Q = 5I$

Змінимо матрицю Q на $Q = I$ (рис.3). У результаті на тих самих ітераціях спостерігаються більші похибки керування, ніж у попередньому випадку.

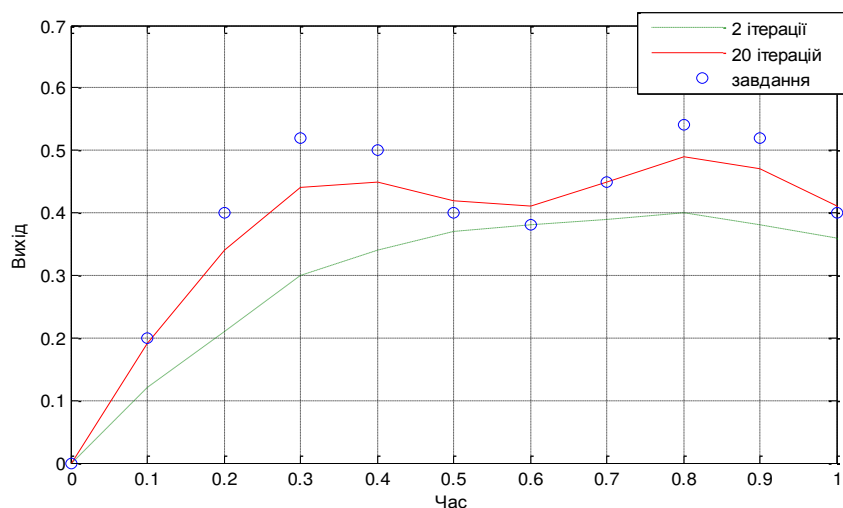


Рис. 3. Вихідні змінні при $Q = I$

Висновки

Запропонований алгоритм керування з ітеративним навчанням забезпечує відслідковування заданих вихідних змінних з достатньою точністю при високій збіжності алгоритму. Одночасно даний алгоритм відрізняється простотою і не вимагає попередньої побудови траєкторії руху системи.

Подальші дослідження мають бути направлені на аналіз ефективності використання даного алгоритму для різних технологічних процесів циклічного характеру.

Список використаної літератури

1. Теория автоматического регулирования, кн. 2. Анализ и синтез линейных непрерывных и дискретных систем автоматического регулирования. М., 1967, —674 с.
2. Зайцев Г. Ф. Теория автоматического управления и регулирования. — 2-е изд., перераб. и доп. — К.: Высшая шк. Головное изд-во, 1989. — 431 с
3. Галковский К., Емельянов М. А., Пакшин П. В., Роджерс Э., “Векторные функции Ляпунова в задачах устойчивости и стабилизации дифференциальных повторяющихся процессов”, Изв. РАН. Теория и системы управления, 2016, № 4, 5–17

4. П. В. Пакшин, Ю. П. Емельянова, М. А. Емельянов, “Синтез управления с итеративным обучением мультиагентными системами на основе 2D-моделей”, Автомат. и телемех., 2018, № 6, 99–118; Autom. Remote Control, 79:6 (2018), 1040–1056
5. H.S. Ahn, Y.Q. Chen, and K.L. Moore, “Iterative learning control: Brief survey and categorization”, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics Part C: Applications and Reviews, vol. 37, no. 6, 2007, pp. 1099–1121.
6. D.A. Bristow, M. Tharayil, and A.G. Alleyne, “A survey of iterative learning control: A learning-based method for high-performance tracking control”, IEEE Control Systems Magazine, vol. 26, no. 3, 2006, pp. 96–114.
7. K.L. Moore, “Iterative Learning Control: An Expository Overview”, Applied and Computational Control, Signals, and Circuits, vol. 1, no. 1, 1999, pp. 151–214.
8. R.W. Longman, “Iterative learning control and repetitive control for engineering practice”, Automatica, vol. 73, no. 10, 2000 pp. 930–954.
9. J.X. Xu, Y. Chen, L.Tong Heng, and S. Yamamoto, “Terminal iterative learning control with an application to RTPCVD thickness control”, Automatica, vol. 35, no. 9, 1999, pp. 1535–1542.
10. G. Gauthier and B. Boulet, “Terminal iterative learning control design with singular value decomposition decoupling for thermoforming ovens”, in Proc. American Control Conf., 2009, pp. 1640–1645.
11. J.X. Xu and D. Huang, “Initial state iterative learning for final state control in motion systems”, Automatica, vol. 44, no. 12, 2008, pp. 3162–3169.
12. S. Arimoto, M. Sekimoto, and S. Kawamura, “Iterative Learning of Specified Motions in Task-Space for Redundant Multi-Joint Hand-Arm Robots”, in IEEE International Conf. on Robotics and Automation, 2007, pp. 2867–2873.
13. C.T. Freeman, Z. Cai, E. Rogers, and P.L. Lewin, “Iterative Learning Control for Multiple Point-to-Point Tracking Application”, IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2010.
14. T.D. Son, D.H. Nguyen and H.S. Ahn, “An Interpolation Method for Multiple Terminal Iterative Learning Control”, in Proc. IEEE Multi-Conference on Systems and Control Conf., 2011, submitted.
15. T.D. Son, and H.S. Ahn, “Terminal Iterative Learning Control with Multiple Pass Points”, in Proc. American Control Conf., 2011.
16. Shan Sun, M. Egerstedt, C.F. Martin, “Control Theoretic Smoothing Spline”, IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 45, no. 12, 2000, pp. 2271–2279.
17. Saad, Yousef (2003). Iterative Methods for Sparse Linear Systems (2 ed.). SIAM. p. 414.

O. Zhuchenko, Cand. Sc. (Eng), Assoc. Prof., **ORCID** 0000-0001-5611-6529
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

CYCLIC PROCESSES CONTROL IN DISCRETE SPACE-TIME TASKS

In many industries there are technological processes that are cyclical in nature. In the control of such processes, the high-efficiency method has been demonstrated by the method of control with iterative learning (ILC). The article introduces a new modification of the method of control with iterative learning (ILC) in a situation where the task of the system is given by a set of values of initial variables at certain points at certain discrete moments of time. Such a statement of the problem calls for the construction of the trajectory of the system through specified points. In this article, we propose a method that ensures that the system passes through given points at a given time without constructing the trajectory of a task. This method involves the formation of control signals using the ILC-algorithm. This allows you to simplify calculations and improve the quality of the system. This method is considered for both continuous and discrete systems. The proposed algorithm of control with iterative learning provides tracking of given output variables with sufficient accuracy at high convergence of the algorithm. Simultaneously, this algorithm is simple and does not require the preliminary construction of the trajectory of the system.

Key words: control, iterative learning, control algorithm, cyclic processes, continuous systems, discrete systems.

References

1. Теорія автоматического регулювання, кн. 2. Аналіз і синтез лінійних неперервних і дискретних систем автоматического регулювання. М., 1967, —674 с.
2. Zaytsev G. F. Теорія автоматического управління і регулювання. — 2-е изд., перероб. і доп. — К.: Vyshaya shk. Golovnoe izd-vo, 1989. — 431 с

3. Galkovskiy K., Emelyanov M. A., Pakshin P. V., Rodzhers E., “Vektornyye funktsii Lyapunova v zadachah ustoychivosti i stabilizatsii differentsialnykh povtoryayuschihsvya protsessov”, *Izv. RAN. Teoriya i sistemy upravleniya*, 2016, № 4, 5–17
4. P. V. Pakshin, Yu. P. Emelyanova, M. A. Emelyanov, “Sintez upravleniya s iterativnyim obucheniem multiagentnyimi sistemami na osnove 2D-modeley”, *Avtomat. i telemeh.*, 2018, # 6, 99–118; *Autom. Remote Control*, 79:6 (2018), 1040–1056
5. H.S. Ahn, Y.Q. Chen, and K.L. Moore, “Iterative learning control: Brief survey and categorization”, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics Part C: Applications and Reviews*, vol. 37, no. 6, 2007, pp. 1099–1121.
6. D.A. Bristow, M. Tharayil, and A.G. Alleyne, “A survey of iterative learning control: A learning-based method for high-performance tracking control”, *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 26, no. 3, 2006, pp. 96–114.
7. K.L. Moore, “Iterative Learning Control: An Expository Overview”, *Applied and Computational Control, Signals, and Circuits*, vol. 1, no. 1, 1999, pp. 151–214.
8. R.W. Longman, “Iterative learning control and repetitive control for engineering practice”, *Automatica*, vol. 73, no. 10, 2000 pp. 930–954.
9. J.X. Xu, Y. Chen, L.Tong Heng, and S. Yamamoto, “Terminal iterative learning control with an application to RTPCVD thickness control”, *Automatica*, vol. 35, no. 9, 1999, pp. 1535–1542.
10. G. Gauthier and B. Boulet, “Terminal iterative learning control design with singular value decomposition decoupling for thermoforming ovens”, in *Proc. American Control Conf.*, 2009, pp. 1640–1645.
11. J.X. Xu and D. Huang, “Initial state iterative learning for final state control in motion systems”, *Automatica*, vol. 44, no. 12, 2008, pp. 3162–3169.
12. S. Arimoto, M. Sekimoto, and S. Kawamura, “Iterative Learning of Specified Motions in Task-Space for Redundant Multi-Joint Hand-Arm Robots”, in *IEEE International Conf. on Robotics and Automation*, 2007, pp. 2867–2873.
13. C.T. Freeman, Z. Cai, E. Rogers, and P.L. Lewin, “Iterative Learning Control for Multiple Point-to-Point Tracking Application”, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2010.
14. T.D. Son, D.H. Nguyen and H.S. Ahn, “An Interpolation Method for Multiple Terminal Iterative Learning Control”, in *Proc. IEEE Multi-Conference on Systems and Control Conf.*, 2011, submitted.
15. T.D. Son, and H.S. Ahn, “Terminal Iterative Learning Control with Multiple Pass Points”, in *Proc. American Control Conf.*, 2011.
16. Shan Sun, M. Egerstedt, C.F. Martin, “Control Theoretic Smoothing Spline”, *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 45, no. 12, 2000, pp. 2271–2279.
17. Saad, Yousef (2003). *Iterative Methods for Sparse Linear Systems* (2 ed.). SIAM. p. 414.

Надійшла 23.08.2019

Received 23.08.2019

УДК 621.3

В.В. Чумак, канд. техн. наук, доц. **ORCID** 0000-0001-8401-7931

М.А. Коваленко, канд. техн. наук, доц. **ORCID** 0000-0002-5602-2001

І.В. Ткачук, магістр. **ORCID** 0000-0002-5717-2458

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

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЛІНІЙНОГО ДВИГУНА ДЛЯ СЕПАРАТОРА ЛОМУ КОЛЬОРОВИХ МЕТАЛІВ

Сепарація лому кольорових та чорних металів в наші часи стає все більш актуальною проблемою. Існують традиційні методи сепарації відходів чорних та кольорових металів. Для автоматизації цього процесу необхідно використовувати механізовані системи на основі лінійних асинхронних двигунів. Дослідженню такого об'єкта присвячена дана робота. В рамках роботи розроблено польові математичні моделі, що реалізуються методом скінчених елементів в програмному пакеті Comsol Multiphysics. В якості об'єкта дослідження використовується лінійний трифазний асинхронний двигун, що призначений для сепарації лому кольорових металів. За допомогою розробленої математичної моделі розраховані основні параметри та характеристики лінійного двигуна та визначено оптимальні межі його

© В.В. Чумак, М.А. Коваленко, І.В. Ткачук, 2019

роботи та необхідна мінімальна конфігурація лому для надійної її сепарації. Проведена серія розрахунків, що дозволяє визначити оптимальні режими роботи лінійного сепаратора та сформульовано рекомендації щодо практичної реалізації експериментального зразка.

Ключові слова: лом; сепаратор; лінійний трифазний асинхронний двигун; математичне моделювання; відходи промисловості; кольорові метали; технічні заходи.

Вступ. На протязі всього часу людства метали та їх сплави розвивалися разом. На честь окремих металів названі цілі епохи – бронзовий (мідні сплави) та залізний вік. Всі найбільші науково-технічні і промислові революції завжди супроводжувалися розвитком матеріалів і, в першу чергу, металів.

Сучасні тенденції в області збереження навколишнього середовища диктують необхідність обов'язкової

утилізації відходів виробництва та відходів споживання (лому). У той же час досягнення науки й техніки у цій сфері сильно ускладнюють процеси переробки відходів. На жаль, світові побажання, які зобов'язують виробників матеріалів і установок (машин) передбачати їх способи утилізації, залишаються в більшості випадків добрими намірами. Тому призначення вторинної кольорової металургії полягає в забезпеченні збору, заготівлі, первинної обробки, виробництва сплавів і напівфабрикатів з використанням лому та відходів кольорових металів. В даний час заготовлюються лом і відходи майже всіх кольорових металів. Якщо врахувати обмежену кількість запасів руди, лом і відходи кольорових металів набувають все більшого значення в задоволенні потреб промисловості в алюмінії, міді, свинцю, цинку та інших металів. На практиці відходи таких кольорових металів називають побічними продуктами але всі відходи мають потенційну споживчу вартість тому їх потрібно залучати до промислового обороту шляхом проведення необхідних організаційних і технічних заходів. Лом і відходи – це так зване сміття промисловості, використання яких вигідне за відповідних обставин [1, с. 5-6].

З фізичної і хімічної точки зору метал з руди та метал з відходів не має ніяких відмінностей. Проте для отримання металу з руди енергетичні затрати на порядок більші, ніж при отримання металу з відходів. У зв'язку з цим отримання кольорових металів з відходів виробництва та споживання вже доволі давно стало конкурентним і ефективним способом [1, с. 21].

Для України спосіб отримання кольорових металів з лому та відходів їх виробництва став надзвичайно актуальним після 1991 р. Тому, що в Україні відсутня промислова здобич руд алюмінію, міді, цинку, свинцю й низки інших кольорових металів. На даний момент з кольорових металів з власної рудної бази в Україні виробляються тільки титан, ртуть, цирконій, кремній, гафній і уран.

Саме тому можна зробити певні висновки:

- одним з основних джерел кольорових металів на ринку України має бути лом і відходи промисловості;

- лом і відходи кольорових металів економічно доцільно переробляти на великих спеціалізованих підприємствах, які мають у своєму розпорядженні сучасні технології та устаткування для обробки, сортування, підготовки й переробки вторинної сировини.

Мета роботи полягає у створенні математичної моделі для розрахунку трифазного лінійного асинхронного двигуна, який буде встановлений на сепаратор кольорових металів.

Матеріали досліджень. Аналіз літературних джерел показав, що на сьогоднішній день існує два основних пристрої що дозволяються виконувати сепарацію кольорових металів: на основі лінійного асинхронного двигуна та на основі магнітного ротору. Принципові схеми вищезгаданих конструкцій показано на рисунку 1.

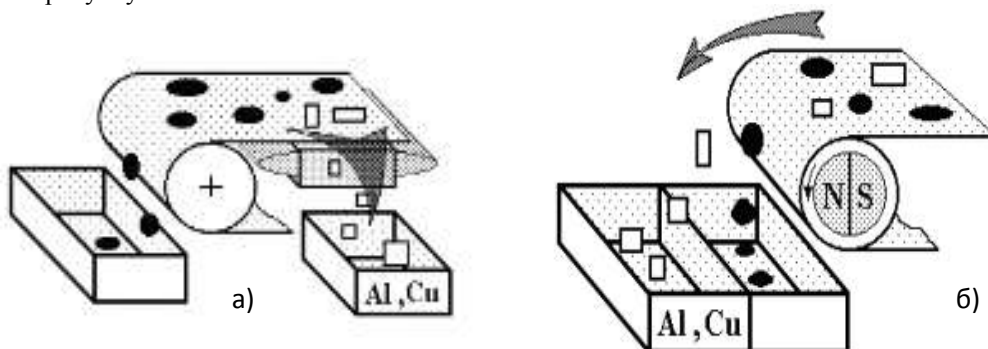


Рис.1 Електродинамічний сепаратор на основі лінійного двигуна (а) та на основі магнітного ротору (б) [2, с. 13]

Сепаратор на основі магнітного ротору працює за наступним принципом: за допомогою обертання з великою швидкістю магнітної системи в робочій зоні сепаратору створюється змінне магнітне поле. В

тілах немагнітних струмопровідних металічних предметів, які попали в зону змінного магнітного поля, збуджуються вихрові струми, які, в свою чергу формуються навколо себе своє локальне магнітне поле. Взаємодія магнітних полів вихрових струмів зі знакозмінним магнітним полем сепаратора призводить до осьових зусиль, які змінюють траєкторію руху електропровідних матеріалів [3, с. 22].

Дана система має такі переваги: відсутні втрати активної та реактивної потужності на збудження основного електромагнітного поля, відносна простота конструкції, відсутність джерел активних втрат в робочому органі.

Недоліки: всі недоліки вищезгаданої системи викликані наявністю постійних магнітів та мінливістю їхніх характеристик в залежності від температури навколишнього середовища, перепадів температур, чутливістю до ударів та вібрацій природнім розмагнічуванням. Інша група недоліків пов'язана з виготовленням магнітного барабану, а саме з надійним кріпленням постійних магнітів у зв'язку з підвищеним діаметром і великою швидкістю обертання, а отже великим значенням відцентрових сил. Необхідно підбирати величину постійних магнітів так, щоб були відсутні паразитні динамічні моменти при його обертанні. Система повинна мати необхідну механічну міцність, оскільки надмірна осьова довжина постійних магнітів може призвести до їх пошкодження. Також в даній системі існують обертові частини, які в свою чергу знижують надійність установки в цілому, оскільки необхідно встановлювати дорогі радіальні підшипники, які потребують регулярного технічного огляду та контролю повітряного проміжку між барабаном і конвеєрною стрічкою. Це в свою чергу призводить до додаткових експлуатаційних затрат та удорожчання системи в цілому. Також в даній конфігурації розміщення контейнерів для електропровідних феромагнітних та немагнітних матеріалів розташовані поруч в кінці конвеєрної стрічки. Тому існує ймовірність похибки при роботі такої системи. А саме перемішування між собою продуктів сепарації. Процесом сепарації металів в даному випадку можна регулювати лише за рахунок зміни швидкості обертання барабану з магнітами та регулюванням повітряного проміжку між барабаном і рухомою конвеєрною стрічкою. Що також збільшує вартість та ускладнює систему наявністю частотного перетворювача для зміни швидкості конвеєрної стрічки та рухомого вала барабана з магнітами.

Сепаратор на основі лінійного асинхронного трифазного двигуна працює за принципом збудження біжучого електромагнітного поля за рахунок збудження трифазним електричним струмом, яким живиться трифазна розподілена обмотка. В даній системі відсутні рухомі частини робочого механізму. Тобто основним рушійним вузлом є трифазний лінійний асинхронний двигун.

Даний сепаратор має такі переваги над попереднім варіантом: відсутні рухомі елементи в системі, що збуджують основне електромагнітне поле; відсутні втрати на тертя; відсутні елементи в конструкції з високою вартістю та низькою механічною міцністю, що підвищує надійність системи в цілому; широкі можливості для регулювання параметрів сепарації:

-ефективність сепарації може регулюватись за рахунок зміни частоти живлення лінійного асинхронного двигуна;

-за рахунок зміни кута атаки лінійного двигуна відносно рухомої стрічки;

-за рахунок зміни повітряного проміжку між об'єктом сепарації та лінійним двигуном;

-за рахунок зміни магнітного потоку в широких межах (застосування диференційованого закону керування з одночасною зміною напруги і частоти);

Можливість реалізації системи з двома індукторами із зустрічно направленими магнітними полями за рахунок відбувається сепарація металів з різною електропровідністю (алюміній, мідь, і т.д.), що в свою чергу підвищує ефективність сепарації лому в цілому. Так як контейнери для електропровідних магнітних і немагнітних матеріалів розмішені відокремлено відпадає можливість змішування елементів сепарації між собою.

До недоліків даної системи можна віднести: споживання реактивної та активної потужності з мережі для створення основного електромагнітного поля; присутні високі температурні втрати за рахунок підвищених електромагнітних навантажень, що в свою чергу потребує встановлення додаткової системи охолодження; у випадку реалізації системи з частотним перетворювачем значно збільшує вартість системи в цілому.

На основі проведеного порівняльного аналізу для реалізації та в якості прототипу для математичного моделювання обрано варіант з системою виконаної на основі лінійного асинхронного трифазного двигуна. Ескіз запропонованої системи виконаної в системі САПР SolidWorks показана на рисунку 2.

На рисунку 2 зображено:

- 1) контейнер для лому електропровідних немагнітних матеріалів;
- 2) контейнер для інших відходів виробництва, що сепарується;
- 3) конвеєр та конвеєрна стрічка;
- 4) лінійний асинхронний трифазний двигун;
- 5) лінія для подачі лому.

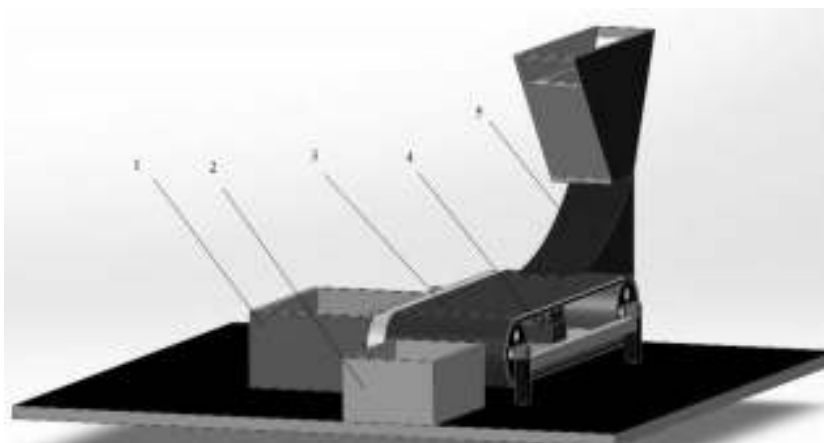


Рис.2 Загальний вид сепаратору з лінійним двигуном

На рисунку 3 показано зовнішній вигляд досліджуваного лінійного асинхронного трифазного двигуна.

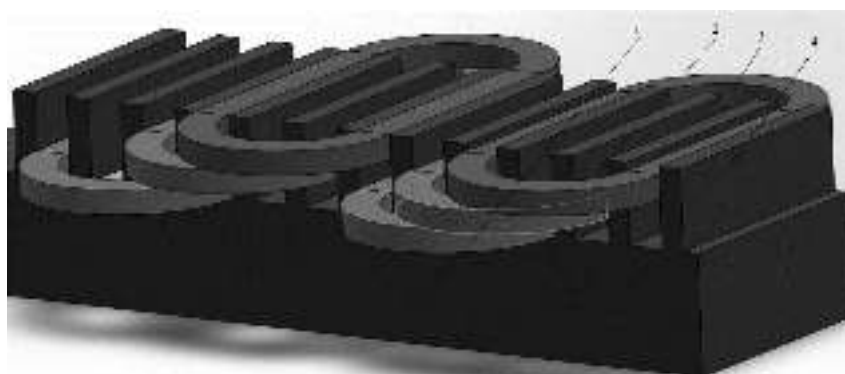


Рис.3 Загальний вид лінійного трифазного асинхронного двигуна

На рисунку 3 зображено:

- 1) магнітне осердя;
- 2) паз магнітопроводу;
- 3) трифазна обмотка;
- 4) зубець магнітопроводу.

Опис математичної моделі

У сучасному світі чисельне моделювання лягає в основу розробки практично будь-яких продуктів і дозволяє зменшити час і вартість виведення кінцевого продукту на ринок.

Пакет COMSOL Multiphysics вдає із себе потужний інструмент, що дозволяє моделювати фізичні процеси з різних областей, в т.ч. спільно: електромагнетизм, гідродинаміка і теплопередача, механіка і акустика, а також хімія. Унікальні можливості моделювання, пропонувані COMSOL Multiphysics, дозволяють оптимізувати характеристики, скоротити час і знизити витрати на розробку кінцевого продукту.

Ефективне чисельне проектування і моделювання обертових електричних механізмів дозволяє, при мінімальних втратах, аналізувати і оптимізувати їх робочі характеристики і режими роботи.

Рівняння Максвелла встановлюють взаємозв'язок між векторними польовими функціями, характеристиками джерел поля та фізичними параметрами матеріальних середовищ. У сучасній формі запису ці рівняння мають наступний вигляд:

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{j} \quad (1)$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\partial \vec{B} / \partial t \quad (2)$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad (3)$$

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho \quad (4)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H}, \vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (5)$$

$$\vec{j} = \gamma \vec{E} + \partial \vec{D} / \partial t + \gamma (\vec{v} \times \vec{B}) + \gamma \vec{E}_{\text{стоп}} + \rho v_p + \operatorname{rot} (\vec{D} \times \vec{v}) \quad (6)$$

У наведеній системі позначено: польові функції – вектори напруженості магнітного \vec{H} та електричного \vec{E} полів, вектор магнітної індукції \vec{B} і вектор електричного зміщення \vec{D} ; коефіцієнти, які характеризують фізичні властивості матеріальних середовищ – магнітна проникність μ , електропровідність γ , діелектрична провідність ε ; щільність електричних зарядів ρ . Вираз (3.1) дозволяє знайти густину струмів \vec{J} , обумовлену сумою доданків різної фізичної природи. Доданок $\gamma\vec{E}$ обумовлює індуквану щільність струму в електропровідному середовищі; доданок $\partial\vec{D}/\partial t$ – щільність струму діелектричного зміщення; доданок $\gamma(\vec{v} \times \vec{B})$ визначає "конвективну складову" густини струму, яка обумовлена рухом електропровідного середовища зі швидкістю \vec{v} відносно магнітного поля з індукцією \vec{B} [4, с.351].

Доданок $\vec{J}_{\text{стор}} = \gamma\vec{E}_{\text{стор}}$ стор визначає щільність струму, яка викликана сторонніми ЕРС; доданок ρv_p характеризує щільність струмів переміщення вільних зарядів, а доданок $\text{rot}(\vec{D} \times \vec{v})$ – "конвективну складову" густини струму, яка обумовлена рухом поляризованого діелектрика.

Перетворення (3.2) шляхом підстановки туди (3.3) і (3.1) приводить до співвідношення:

$$\text{div}(\sigma\vec{E}) + \frac{\partial(\text{div}D)}{\partial t} = 0. \quad (7)$$

Відносно потенціала U рівняння виглядає наступним чином:

$$\text{div}(-\sigma \cdot \text{grad}U) + \frac{\partial}{\partial t} \text{div}(-\varepsilon \cdot \text{grad}U) = 0 \quad (8)$$

Формулювання задачі складається з рівняння Пуассона, що описує електростатичне поле:

$$\nabla \cdot \varepsilon E = \rho, \quad (9)$$

Та рівнянні розтікання струмів у провідному середовищі

$$\nabla \cdot \mathbf{j} = -i\omega\rho, \quad (10)$$

Включаючи до уваги закон Ома,

$$\mathbf{j} = g\mathbf{E} \quad (11)$$

Тоді рівняння потенціалу U набуває належного кінцевого вигляду:

$$\nabla \cdot \left(\left[\varepsilon - \frac{i\sigma}{\omega} \right] \nabla U \right) = 0 \quad (12)$$

Електропровідність g , компоненти тензора діелектричної проникності $\varepsilon_{\mu\nu}$ (ε_z и ε_r) постійні всередині кожного блоку моделі.

Кінцева мета математичного моделювання – визначити кількісні співвідношення між параметрами оригіналу за допомогою вивчення тих функціональних залежностей, які містяться в математичній моделі.

У загальному випадку будь-яка польова функція є векторної функцією, і кожна її складова залежить від чотирьох незалежних змінних – трьох просторових координат точки і часу.

При розрахунку магнітного поля використовувалося нестационарне нелінійне диференціальне рівняння для векторного магнітного потенціалу (\vec{A}) в рухомому електропровідному середовищі :

$$\vec{\nabla} \times \frac{1}{\mu} (\vec{\nabla} \times \vec{A}) - \gamma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \gamma \vec{V} \times (\vec{\nabla} \times \vec{A}) = -\vec{J}_{\text{стор}}, \quad (13)$$

де: μ , σ – магнітна проникність та електропровідність;

\vec{V} , $\vec{J}_{\text{стор}}$ – вектори швидкості руху середовища та сторонньої густини струму; $\vec{\nabla}$ – диференціальний Набла-оператор.

Для розрахунку електромагнітного поля в квазістатичному режимі рівняння (3.18) набуває наступного вигляду:

$$\vec{\nabla} \times \frac{1}{\mu} (\vec{\nabla} \times \vec{A}) - \gamma j \omega + \gamma \vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \vec{A}) = -\vec{J}_{\text{стоп}} \quad (14)$$

Рівняння, які описують матеріали, що використовувались при моделюванні:
Для сталі:

$$H = f(|B|) \frac{B}{(|B|)} \quad (15)$$

Для обмотки:

$$B = \mu_0 \mu_r H \quad (16)$$

Сили і моменти розраховані з використанням тензору напружень Максвелла доступні в фізиці електростатики, електричного струму, магнітних полів і магнітних та електричних полів. В фізиці електростатики і електричних струмів, сила розраховується шляхом інтеграції виразу на поверхні об'єкта, на який діє сила. .

В обох виразах, E – електричне поле, D електричний зсув, H магнітне поле, B індукція потоку, а n – нормаль до об'єкта.

Метод сили Лоренца.

Сила Лоренца визначається як $\mathbf{F} = \mathbf{J} \times \mathbf{B}$. Даний метод є дуже точним для електромагнітних розрахунків сил електропровідних доменів.

В найбільш поширених областях досліджень, наведені вище формули можуть бути використані для обчислення миттєвих значень сили і крутного моменту. Але часто потрібно обчислити середнє значення цих величин протягом циклу, чи наприклад пари електромагнітних сили в іншій галузі фізики.

Чисельна реалізація тривимірної моделі здійснюється за допомогою методу скінченних елементів, що являє собою числову техніку знаходження розв'язків інтегральних та часткових диференціальних рівнянь (ЧДР). Процес розв'язання побудований або на повному усуненні диференціального рівняння для стаціонарних задач, або на розкладі ЧДР в апроксимуючу систему звичайних диференціальних рівнянь, які потім розв'язуються використанням якої-небудь стандартної техніки. Однією з них є метод скінченних елементів (МСЕ).

Основна ідея МСЕ полягає в тому, що будь-яку неперервну функцію, таку, як векторний або скалярний магнітний потенціал, індукцію та температуру, можна апроксимувати дискретною моделлю, яка будується на безлічі частково-неперервних функцій, визначених на кінцевому числі підобластей. Рішення рівнянь поля в МСЕ визначається виходячи з умови мінімуму енергетичного функціоналу.

В основу програмного пакету COMSOL Multiphysics, на базі якого проводиться моделювання, покладено метод скінчених елементів (МСЕ) [4, с. 352].

При моделювання тривимірної моделі лінійного асинхронного трифазного двигуна була побудована сітка скінчених елементів, яка зображена на рисунку 4.

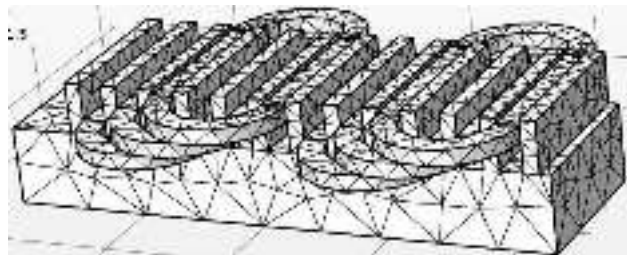


Рис.4 Сітка скінчених елементів досліджуваного лінійного трифазного асинхронного двигуна

В середньому час розрахунку однієї поставленої задачі складає 1 год. 20 хв на ПЕОМ із наступними параметрами:

- Процесор Intel core 2 duo E8400 3.0 GHz;
- Оперативна пам'ять 4 Gb, DDR2;
- Відеокарта Nvidia Geforce GT 440 1 Gb.

Що є прийнятним для виконання серії польових математичних розрахунків та аналізу отриманих результатів.

Результати моделювання

Розподіл електромагнітного поля та векторного магнітного потенціалу досліджуваного лінійного асинхронного двигуна в режимі неробочого ходу показана на рисунку 5.

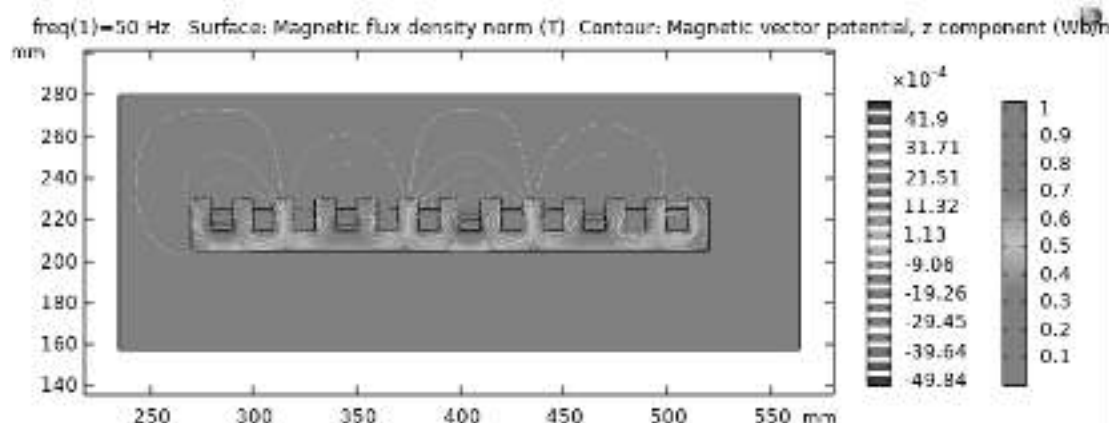


Рис.5 Розподіл електромагнітного поля

Як видно з рисунку 5, що середня величина магнітної індукції в ярмі статора складає 0.45 Тл., в зубці 0.51Тл., на висоті 1 мм від поверхні індуктора в повітряному проміжку складає 0.13 Тл.

Розподіл середнього значення магнітної індукції в повітряному проміжку на висоті 5 мм над індуктором лінійного двигуна показана на рисунку 6.

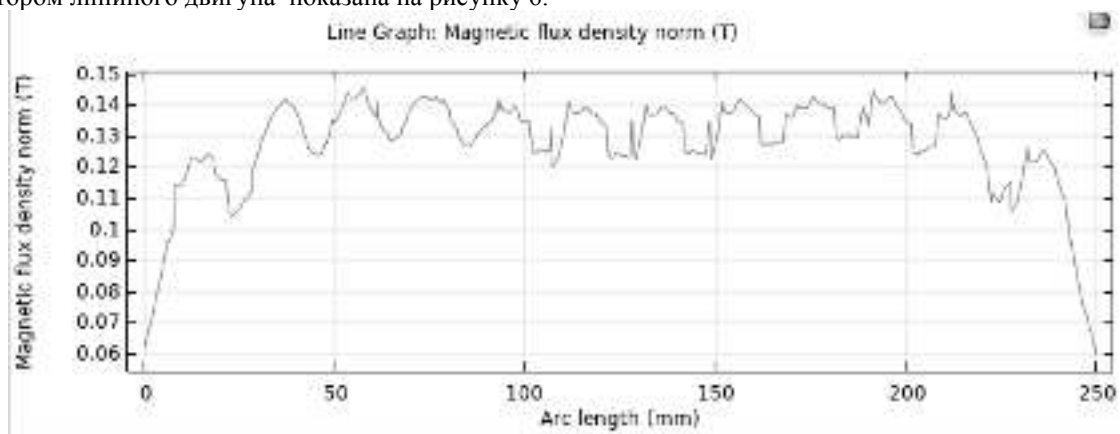


Рис.6 Розподіл магнітної індукції в повітряному проміжку на висоті 5 мм

На наступному етапі математичного моделювання проведено ряд чисельних електромагнітних розрахунків для випадку коли в повітряному проміжку розташовується заготовка певної конфігурації. Таким чином вивчалась залежність електромагнітної сили, що буде діяти на заготовку в залежності від її конфігурації, електропровідності (типу матеріалу), частоти живлення та висоти над поверхневою лінією індуктора. Результати дослідження наведено нижче.

Розподіл електромагнітного поля та векторного магнітного потенціалу лінійного асинхронного двигуна при появі в повітряному проміжку заготовки показано на рисунку 7.

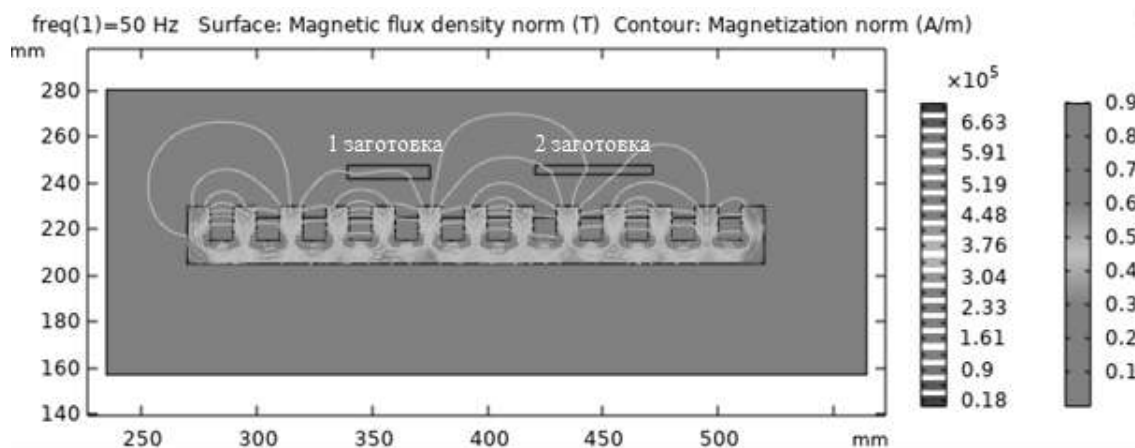


Рис.7 Розподіл електромагнітного поля при наявності заготовок

Як видно з рисунку 7, що середня величина магнітної індукції в ярмі статора складає 0.48 Тл., в зубці 0.41Тл., на висоті 1 мм від поверхні індуктора в повітряному проміжку складає 0.11 Тл. Як видно на холостому ході індукції були дещо вищими, це пояснюється дією реакції якоря.

Наступним кроком моделювання була зміна положення заготовки відносно нерухомого індуктора з подальшим розрахунком електромагнітних зусиль.

Результати розрахунків приведені в таблиці 1.

Табл. 1 Зміна електромагнітної сили [Н*м] при різних проміжках (15 мм та 7,5 мм)

15 мм	Тип металу			7,5 мм	Тип металу		
	Al	Cu	St		Al	Cu	St
1 заготовка	7,52	10,4	43,2	1 заготовка	11,84	17,76	59,04
2 заготовка	26,40	28,48	36,8	2 заготовка	43,2	42,56	69,44

Очевидно, що чим вище знаходиться заготовка відносно горизонтальної площини індуктора тим менша буде величина зусилля, що на неї діє. Це пояснюється тим, що середня величина магнітної індукції зменшується при збільшенні повітряного проміжку. Тому необхідно визначити оптимальну величину зазору між індуктором магнітопроводу лінійного двигуна та заготовкою.

Далі наведено результати розрахунку електродинамічних зусиль при зміні провідності заготовок. Дані розрахунків приведені в таблиці 2. Також за даними таблиці 2 було побудовано криву, яка представлена на рисунку 8.

Табл.2 Зміна електродинамічних зусиль [Н*м] в залежності від провідності

№ заготовки	Електрична провідність							*e7
	0	1	2	3	4	5	6	
1	0	6,08	8,32	10,24	12,48	15,04	17,76	
2	0	17,44	32,16	40,32	43,52	43,84	42,56	

Як видно з графіку, що зображені на рисунку 8 величина електромагнітного зусилля суттєво залежить від електропровідності матеріалу. Чи вище значення електропровідності тим вище величина електромагнітного зусилля. Це пояснюється тим, що при збільшенні електропровідності заготовки зростає величина наведених вихрових струмів в ній. З іншого боку, як показують розрахунку величина електромагнітного зусилля залежить від конфігурації заготовки. Чим більшу активну площину заготовка має тим вище відповідне значення електромагнітного зусилля що діє на неї.

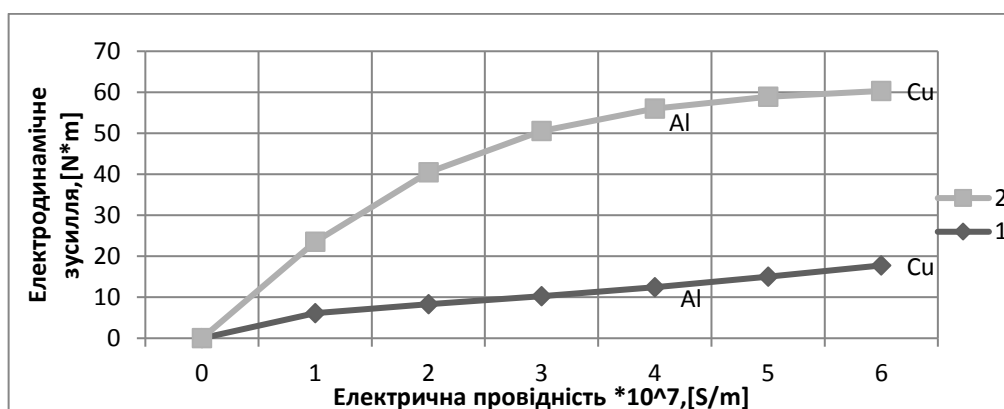


Рис.8 Зміна електродинамічного зусилля від електричної провідності

Наступним кроком моделювання була зміна частоти живлення при двох варіантах заготовок, а саме заготовки із міді та алюмінію. Дані розрахунків наведені в таблиці 3 та таблиці 4. За цими даними було побудовано дві залежності, які приведені на рисунку 9 та рисунку 10.

Табл. 3 Зміна частоти живлення для алюмінію

№ заготовки	Зміна частоти живлення заготовки з алюмінію							
	5 Гц	10 Гц	20 Гц	30 Гц	40 Гц	50 Гц	75 Гц	100 Гц
1	2,88	5,12	7,52	8,8	10,24	11,84	16,8	21,28
2	6,4	13,12	25,6	34,88	40,48	43,2	43,04	39,36

Табл. 4 Зміна частоти живлення для міді

№ заготовки	Зміна частоти живлення заготовки з міді							
	5 Гц	10 Гц	20 Гц	30 Гц	40 Гц	50 Гц	75 Гц	100 Гц
1	4,32	6,72	9,12	11,52	14,56	17,76	23,84	26,88
2	10,4	20,8	36,16	42,72	44	42,56	35,84	29,12

Як видно з результатів розрахунку, що зображені на рисунку 9 та 10 величина електромагнітного зусилля суттєво залежить від частоти живлення лінійного трифазного асинхронного двигуна. З одного боку величина магнітного потоку прямо пропорційна частоті, з іншого боку величина індукованих вихрових струмів у вторинному елементі (заготовці) теж прямо пропорційна частоті зміні магнітного потоку і характер залежності зусилля від частоти повинен бути лінійною залежністю. Однак у векторній формі електромагнітне зусилля являє собою добуток вектора магнітної індукції на вектор густини струму, які прямо пропорційно залежать від частоти.

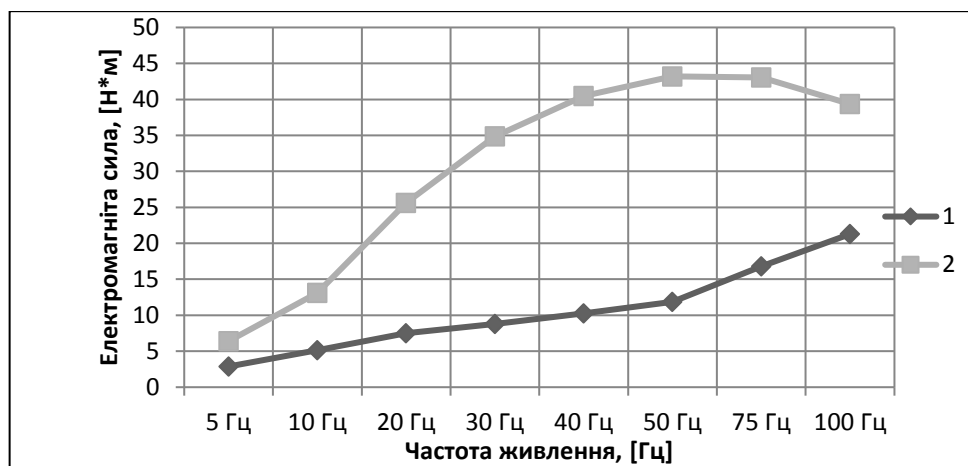


Рис.9 Зміна частоти живлення для алюмінію

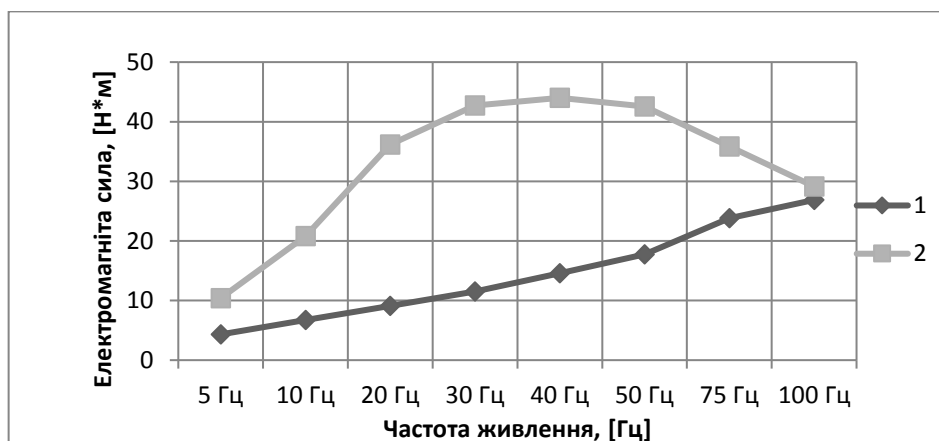


Рис.10 Зміна частоти живлення для міді

З іншого боку, при зміні частоти змінюється глибина проникнення струмів в електропровідне середовище вторинного елемента і при збільшенні частоти підсилюється ефект витіснення струму, що

означає збільшення ефективного омичного опору заготовки. А отже сумарний вихровий струм в них з ростом частоти буде зменшуватись, відповідно буде зменшуватись величина зусилля. Тобто як показують розрахунки, для певного матеріалу і для певної конфігурації вторинного елемента є оптимальне співвідношення частоти і напруги живлення, при яких досягається максимальне значення електромагнітного зусилля. Це добре видно на рисунках 9 та 10.

Практична реалізація

На основі проведених електромагнітних розрахунків уточнено геометричні розміри, що взяті в основу для виготовлення прототипу системи сепарації кольорових металів на основі лінійного асинхронного трифазного двигуна. Фотографія процесу виготовлення лінійного асинхронного трифазного двигуна, що буде лежати в основі системи сепарації кольорових металів зображено на рисунку 11.



Рис.11 Прототип лінійного двигуна

На рисунку 11 показано процес виготовлення обмотки статора лінійного асинхронного трифазного двигуна, а саме другої котушкової групи.

Висновки

За результатами проведеної роботи зроблені наступні висновки:

1) проведено літературно патентний аналіз показав, що існує 2 основних типи сепараторів кольорових металів. В якості прототипу обрано сепаратор лінійного типу на базі лінійного асинхронного трифазного двигуна;

2) розроблено тривимірну польову математичну модель, що реалізована методом скінчених елементів для аналізу основних параметрів та характеристик досліджуваного лінійного сепаратора кольорових металів;

3) для забезпечення максимально ефективної сепарації необхідно забезпечувати мінімально можливий технологічний проміжок між горизонтальною площиною лінійного двигуна та вторинного елемента. Це повинно забезпечуватись за рахунок якості та відповідної культури технології виробництва таких сепараторів;

4) величина електромагнітного зусилля залежить від конфігурації вторинного елемента та його електропровідності. Це явище можна використовувати для вибіркової сепарації різних металів. Крім того необхідно забезпечувати таку величину магнітної індукції в повітряному проміжку, щоб величина зусилля була достатня для сепарації вторинних елементів різної конфігурації, габаритів та ваги;

5) як показали результати моделювання сепаратор на основі лінійного асинхронного двигуна має широкі можливості для регулювання величини зусилля. Це в першу чергу реалізується за рахунок зміни частоти напруги живлення. Існує оптимальне співвідношення частоти та напруги живлення, при якому досягається максимальне зусилля, що буде діяти на вторинний елемент;

6) за результатами електромагнітних розрахунків розроблено ескіз прототипу для практичної реалізації системи сепарації кольорових металів на основі лінійного двигуна.

Список використаної літератури

1. МЕТАЛУРГІЯ КОЛЬОРОВИХ МЕТАЛІВ / Бредихін В.М., Смирнов В.О., Пожувєв В.І та ін.] – Запоріжжя: Запорізька державна інженерна академія, 2009. – 452 с.

2. INDUCTION MACHINES FOR ELECTRODYNAMIC SEPARATION OF NON-FERROUS METALS / A.Yu.Konyayev, S.L.Nazarov. // Faculty of Electrical Engineering, Ural Federal University. – 2016. – С. 13–14.

3. Математичне моделювання електричних машин з постійними магнітами/ КОВАЛЕНКО М.А., ВАСЬКОВСЬКИЙ Ю.М., ГАЙДЕНКО Ю.А. // National Technical University of Ukraine. – 2017. – С. 193.

4. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ МУФТ / МА Коваленко, ИВ Маляр. // "Міжнародний науково-технічний журнал" Сучасні проблеми електроенергетехніки та автоматики". – 2017. – С. 351–352.

V. Chumack, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. ORCID 0000-0001-8401-7931

M. Kovalenko, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. ORCID 0000-0002-5602-2001

I. Tkachuk, Msc. ORCID 0000-0002-5717-2458

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

MATHEMATICAL SIMULATION OF A LINEAR INDUCTION MOTOR FOR COLOR METALS SEPARATION

Non-ferrous and metal scrap separation nowadays is becoming more and more actual problem. There are several traditional methods of separating ferrous and non-ferrous metal waste. To automate this process, it is necessary to use mechanized systems based on linear induction motors. This paper is presented to the study of such type object. In this paper several field mathematical models have been developed, which are implemented by the finite element method in Comsol Multiphysics software package. The object of the study is a linear three-phase induction motor which is constructed for the non-ferrous metal scrap separation. With the help of the developed mathematical model the basic parameters and characteristics of a linear motor are calculated and the optimal limits of its operation are determined and the minimum configuration of the scrap is required for its reliable separation. A series of calculations was performed to determine the optimal operating modes of the linear separator and to formulate recommendations for the practical implementation of the experimental one. In this paper relation between electrical conductivity and force was calculated. It was performed due to optimal practical recommendations, which are used in real life operation.

Keywords: scrap, separator, linear three-phase induction motor, mathematical modeling, industry waste, non-ferrous metals, technical measures.

References

1. METALURHIYA KOL'OROVYKH METALIV (METALLURGY OF COLOR METALS) / Bredykhin V.M., Smyrnov V.O., Poruchyov V.I, etc.]. - Zaporizhzhya: Zaporiz'ka derzhavna inzhenerna akademiya, 2009. - 452 p.

2. INDUCTION MACHINES FOR ELECTRODYNAMIC SEPARATION OF NON-FERROUS METALS / A.Yu. Konyayev, S.L.Nazarov. // Faculty of Electrical Engineering, Ural Federal University. – 2016. – p. 13–14.

3. Matematychnye modelyuvannya elektrychnykh mashyn z postynnymy mahnitamy (Mathematical modeling of electric machines with constant magnet) / KOVALENKO M.A., VAS'KOVSKYY YU.M., HAYDENKO YU.A.. // National Technical University of Ukraine. – 2017. – p. 193.

4. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ МУФТ (MATHEMATICAL MODELING OF ELECTROMAGNETIC COUPLANG) / MA Kovalenko, YV Malyar. // Mizhnarodnyy naukovo-tekhnichnyy zhurnal " Suchasni problemy elektroenerhotekhniki ta avtomatyky". – 2017. – p. 351–352.

Надійшла 23.08.2019

Received 23.08.2019

УДК 621.311.42

О.В. Сподинський, інженер

Інститут електродинаміки Національної академії наук України

А.В. Зайченко, магістрант

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

ВПРОВАДЖЕННЯ ПРОТИАВАРІЙНОЇ АВТОМАТИКИ МЕРЕЖІ 110-150 кВ ПІВДЕННОЇ ЕС, ЯК ЗАСОБУ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ СПОЖИВАЧІВ

У статті розглянуто питання підвищення надійності електропостачання споживачів, шляхом впровадження протиаварійної автоматики, у енергодифіцитних районах південно західної частини Південної енергосистеми. Описано комплекс технічних заходів та перелік об'єктів, необхідних для реалізації протиаварійної автоматики. Сформовано основні технічні вимоги та функції, які необхідні для
© О.В. Сподинський, А.В. Зайченко , 2019

підвищення надійності електропостачання споживачів.

Ключові слова: підстанція, протиаварійна автоматика, енергосистема, електропостачання, добовий графік навантаження.

Основним генеруючим джерелом Південної енергосистеми (ЕС) є Південноукраїнська атомна електростанція (АЕС), яка забезпечує електропостачання споживачів центральних та, частково східних районів енергосистеми, потреба в потужності яких також може бути забезпечена за рахунок отримання електроенергії від Каховської ГЕС або з надлишкової Дніпровської ЕС, а саме від Криворізької та Запорізької теплової електростанції (ТЕС).

Найбільш проблематичним є забезпечення стабільного електропостачання споживачів південно-західної частини енергосистеми, а саме Одеський та Арцизький енергорайони, де розташовані підстанції (ПС) 330 кВ Ново-Одеська, ПС 330 кВ Усатове та ПС 330 кВ Арциз.

Саме в цьому регіоні зосереджена більшість збудованих в Південній ЕС сонячних електростанцій та тих,

що планується побудувати найближчим часом загальною потужністю близько 324 МВт (у 2020 р. — понад 950

МВт). Планується також введення значного обсягу потужності на ВЕС поблизу ПС 330 кВ Трихати, 330 кВ Ново-Одеська та ПС 330 кВ Миколаїв (у 2020 р. планується ввести близько 2000 МВт). На жаль, нового електромережевого будівництва системного значення власниками ні ВЕС, ні СЕС не заплановано [1].

Тому перспективи щодо забезпечення споживачів південних регіонів енергією відновлюваних джерел стримується, перш за все, пропускнуною спроможністю внутрішніх електричних мереж та можливостями регулювання добового балансу потужності у випадках непрогнозованого суттєвого зменшення (збільшення) потужності ВЕС чи СЕС через погодні умови.

Стан електричної мережі південно-західної частини Одеської області (Арцизький енерговузол) характеризується вкрай низькою надійністю електропостачання споживачів, яка визначається такими основними фактами [3]:

- відсутність власних базисних та маневрених генеруючих потужностей;
- відсутність резервного живлення ПС 330 кВ Арциз по напрузі 330 кВ від мережі ОЕС України (підстанція з'єднана однією ПЛ 330 кВ з електричними мережами суміжної енергосистеми – з ВРУ 330 кВ Молдавської ДРЕС);
- значне зношення ПЛ та обладнання, яке експлуатується на підстанціях;
- слабкі протяжні зв'язки 110 кВ з опорними підстанціями 330 кВ Одеського енерговузла;
- ускладнене здійснення ремонтів ряду ПЛ 110 кВ, траси яких проходять територією суміжної держави, в тому числі ПЛ Молдавська ДРЕС - ПС 110 кВ Старокозаче.

Проблема дефіцитних за генеруючими потужностями південно-західних районів Південної ЕС залишається й за умови необхідності забезпечення видачі потужності від нових електростанцій на відновлювальних джерелах енергії (ВДЕ). Ці обставини можуть привести до розвитку непередбачуваних аварійних ситуацій в електричних мережах регіону.

Тому для часткового вирішення проблем надійності електропостачання споживачів в південно-західних районах Південної ЕС було впроваджено комплекс протиаварійної автоматики (ПА) південно-західних районів Південної ЕС.

Комплекс ПА впроваджений для забезпечення надійного енергопостачання відповідальних споживачів регіону:

- при відключенні живильних зв'язків й аварійному дефіциті активної й реактивної потужності викликаному аварійним відключенням ПЛ;
 - при зниженні генерації відновлюваними джерелами енергії в ремонтних режимах живильних ПЛ.
- Протиаварійне керування виконується за рахунок керування джерелами активної й реактивної потужності й дозованого відключення менш відповідальних споживачів на об'єктах регіону.

Основна мета створення комплексу ПА:

- підвищення надійності та ефективності роботи об'єднаної енергосистеми (ОЕС) України;
- своєчасне надання оперативному персоналу енергосистеми та ОЕС достовірної інформації в режимі плинного часу про хід технологічного процесу, стан контролюючого енергорайону та комплексу ПА;

- забезпечення персоналу ретроспективною технологічною інформацією (реєстрація подій, розрахунок показників) для аналізу, оптимізації та планування роботи енергорайону та його ремонту;
- підвищення довговічності, ступеня експлуатаційної надійності обладнання.
- зменшення збитків від помилок персоналу.

До складу комплексу ПА входить:

- центральний комплект протиаварійної автоматики (ЦКПА) на ПС 330 кВ;
- периферійні комплекти протиаварійної автоматики (ПКПА) на віддалених підстанціях.

На підстанціях, контрольованих ПКПА, встановлюються (див. табл.1):

- основна периферійна шафа протиаварійної автоматики (ПШПА);
- дублююча периферійна шафа протиаварійної автоматики;
- шафа вимірів (ШВ);
- шафа збору інформації та резервування вимірів (ШЗІРВ);
- засоби синхронізації часу.

Таблиця 1. Перелік підстанцій з контрольованими ПКПА.

Назва підстанції	Основна ПШПА	Резервна ПШПА	ШВ	ШЗІРВ
ПС 330 кВ Арциз	+	+	+	+
ПС 110 кВ Болград	+	+	+	+
ПС 110 кВ Рені	+	+	+	+
ПС 110 кВ	+	+	+	+
ПС 110 кВ Еталон	+	+	+	+
ПС 110 кВ Ізмаїл	+	+	+	+
ПС 110 кВ Кілія	+	+	+	+
ПС 110 кВ Ст.	+	+	+	+
ПС 110 кВ Коса	+	+	+	+
ПС 110 кВ Арциз			+	+

На ПС 330 кВ Арциз встановлюється ЦКПА, до якого належать:

- основна шафа сервера комплексу ПА;
- резервна шафа сервера комплексу ПА;
- шафа сервера збору інформації;
- комунікаційна стійка;
- автоматизовані робочі місця (АРМ).

Таблиця 2. Перелік об'єктів відключення навантаження

Підстанція	Приєднання	Потужність, МВт	Черга
ПС 330 кВ Арциз	приєднання 110 кВ Білолісся	10	5
ПС 110 кВ Коса	приєднання 35 кВ Ялпуг	1,5	3
	приєднання 35 кВ ІНС 15	1	
ПС 110 кВ Кілія	приєднання 35 кВ РП Парапори	2,5	1
	приєднання 10 кВ Город	3,2	
ПС 110 кВ Залізничне	приєднання 35 кВ Червоноармійське	6	4
ПС 110 кВ Болград	приєднання 35 кВ Табаки	2	4
	приєднання 10 кВ Сільський	1	
	приєднання 10 кВ Тополине	1,2	
ПС 110 кВ Ізмаїл	приєднання 35 кВ Порт	3	2
	приєднання 6 кВ ТП 233	1,2	
	приєднання 6 РП 5	1,5	
ПС 110 кВ Еталон	приєднання 35 кВ Північна	12	3
ПС 110 кВ Рені	приєднання 10 кВ Сільський	1	4
	приєднання 10 кВ РП 1	2	
	приєднання 10 кВ Порт 1	1,5	
Всього		50,6	1-5

Передача значень контрольованих параметрів та команд ПА виконується по існуючих ВЧ трактах по ПЛ 110 кВ та по волоконно-оптичних каналах. У якості резервного каналу передачі даних використовується обладнання GSM модемів по стандарту 3G.

Комплекс ПА функціонує безперервно, а саме здійснює безперервний збір та обробку технологічної інформації, відображає на мнемосхемах АРМ диспетчера поточний стан об'єктів, підключених до комплексу, і параметрів їх режимів. Робота комплексу ПА полягає у тому, що при отриманні на локальному рівні сигналу на відключення навантаження від централізованого комплексу ПА виконується відключення навантаження з контролем потужності вимкненого навантаження та рівнів напруги в післяаварійному режимі. Якщо, після відключення навантаження, напруга на секціях шин ПС значно збільшується, то локальною частиною комплексу ПА, розташованому безпосередньо на об'єкті з урахуванням величин фактично вимкненого навантаження та напруги може бути реалізовано функцію дозованого автоматизованого ввімкнення навантаження. Такий підхід зменшує кількість необґрунтованих відключень електропостачання споживачів [2].

В табл. 2 наведено перелік об'єктів відключення навантаження та їх розподіл по чергам.

Отже, впровадження комплексу ПА підвищує надійність електропостачання споживачів за рахунок дозованої дії на відключення навантаження при виникненні коливань потужності в мережі, що в свою чергу полегшує регулювання добового графіку навантаження ЕС.

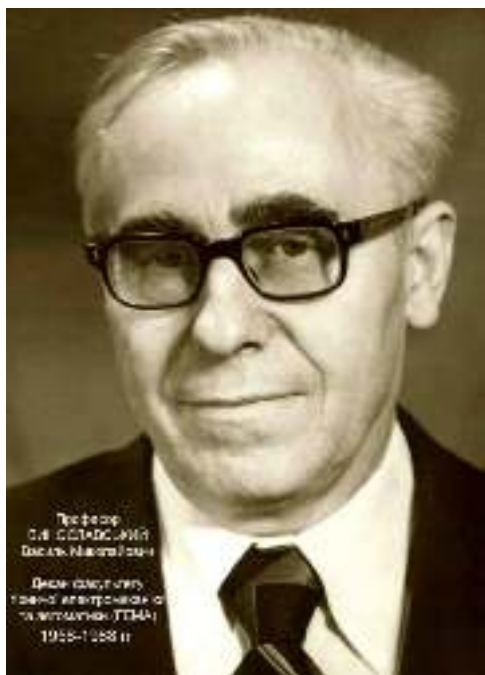
Список використаної літератури

1. Звіт з оцінки відповідності (достатності) генеруючих потужностей (доопрацьований) / НЕК «Укренерго» 2018р.
2. Технічне завдання на розробку комплексу протиаварійної автоматики мережі 110-150 кВ Південної ЕС / НЕК «Укренерго» 2016р.
3. Лінник О.М., Кануннікова Р.Є., Проблеми впровадження вітрових та сонячних електростанцій на території Південної енергосистеми та вплив їх роботи на режими об'єднаної енергосистеми / Інформаційний збірник «Промислова електроенергетика та електротехніка» 2015р.

Надійшла 21.07.2019

Received 21.07.2019

ВИНОСЛАВСЬКИЙ ВАСИЛЬ МИКОЛАЙОВИЧ



У січні 2020 року виповнилось 100 років з дня народження заслуженого працівника вищої школи УРСР, лауреата Державної премії України, професора **Винославського Василя Миколайовича**, який протягом тривалого часу очолював факультети: гірничий, автоматики та приладобудування, гірничої електромеханіки і автоматики Київського політехнічного інституту.

Василь Миколайович народився у 1920 році в селі Лука-Барська Барського району на Вінниччині. З 14 років він починає працювати в автоколоні «Дорбуд» м. Києва. Після закінчення середньої школи в 1938 році вступає до Київського політехнічного інституту на електротехнічний факультет, де навчався за спеціальністю «Електричні мережі та системи».

У 1941 році Василь Миколайович добровільно пішов на фронт, на захист Вітчизни. В 1941–1942 роках він є слухачем Ташкентського військового училища зв'язку. Після закінчення училища направляється на фронт начальником зв'язку 1368 зенітного артилерійського полку 25-ї дивізії Центрального фронту. В 1943 р. брав участь у битві під Понирями на Курській дузі, де був тяжко поранений. У 1944 році капітан Радянської Армії Винославський В.М. був демобілізований і продовжив навчання в Київському політехнічному інституті,

який з відзнакою закінчив у 1946 році. Після закінчення інституту працює на посаді асистента кафедри електричних мереж та техніки високих напруг, успішно поєднуючи навчально-педагогічну роботу з громадською. В період 1948–1952 років навчається в аспірантурі на кафедрі електричних мереж, після закінчення якої в 1952 році захищає кандидатську дисертацію.

Ще будучи аспірантом, Василь Миколайович був направлений на роботу на кафедру гірничої електромеханіки нещодавно створеного гірничого факультету. Він активно включився в навчальний процес, виконуючи значну роботу з постановки спеціальних дисциплін електротехнічного напрямку,



створення лабораторій, розроблення навчально-методичного забезпечення дисциплін. В 1953 році В.М. Винославський отримав звання доцента, працював на посаді доцента кафедри гірничої електромеханіки, а з 1954 по 1988 рік стає її завідувачем. На кафедрі значно активізувалась наукова робота, проводились інтенсивні наукові дослідження з регулювання напруги в електричних мережах, удосконалення систем електропостачання вугільних шахт, розроблення спеціальних трансформаторів з регулюванням напруги під навантаженням, пускових агрегатів для електросвердел тощо. Працювала науково-дослідна група, яка проводила наукові дослідження на замовлення Конотопського заводу «Червоний металіст», комбінатів «Укрзахідвугілля», «Укрбурвугілля» та ін. В цей період на кафедрі зароджується школа електропостачання промислових підприємств, яка пізніше стала відомою на теренах колишнього СРСР.

З 1955 року В.М. Винославський виконує обов'язки заступника декана, а в 1958 році призначається деканом факультетів: гірничого, автоматики та приладобудування, гірничої електромеханіки та автоматики і працює на цій посаді до 1988 року.

Для Василя Миколайовича завжди були характерними творчий підхід до роботи, гостре відчуття актуальності нагальних проблем. Так, за його ініціативою, з 1959 року почалась підготовка фахівців за спеціальністю «Автоматизація і комплексна механізація гірничої промисловості».

Під керівництвом В.М. Винославського для нової спеціальності вперше в країні були розроблені навчальні плани, програми дисциплін електромеханічної, електротехнічної підготовки та з автоматизації. Авторський колектив кафедри (Винославський В.М., Рибченко П.Ф., Попович М.Г., Полянський М.О., Данильчук Г.І.) підготував та вперше в країні видав навчальний посібник «Автоматизація виробничих процесів вугільних шахт».

Василь Миколайович проводив значну роботу з підготовки науково-педагогічних кадрів вищої кваліфікації. Ним особисто було підготовлено 34 кандидати наук, за його консультування захищено 5 докторських дисертацій. У 1972 році йому присвоєно вчене звання професора, а в 1974 році він був удостоєний почесного звання «Заслужений працівник вищої школи України».

На кафедрі досліджувалися проблеми створення засобів регулювання напруги, оптимізації режимів електропостачання, систем електропостачання гірничих підприємств, апаратів бездугової комутації, розроблені підсистеми «Електропостачання» в системах АСУП для великих промислових об'єднань. Кафедра підтримувала тісні зв'язки з іншими навчальними закладами колишнього СРСР та зарубіжними країнами. Особливо успішно в цьому плані співпрацювала кафедра електропостачання з Вроцлавською політехнікою, Лейпцігською вищою технічною школою, з Вісмарською вищою школою. Проводились спільні наукові дослідження, конференції, лекції, практики студентів, захищено кандидатські дисертації, підготовлено три навчальні посібники з грифами міністерств освіти. Протягом багатьох років професор В.М. Винославський очолював гірничу секцію науково-технічної ради Мінвузу України, був членом президії навчально-методичної ради з гірничої освіти колишнього СРСР, головою ради із захисту дисертацій, головою гірничої секції республіканського будинку економічної та науково-технічної пропаганди, членом науково-технічної ради інституту «Автоматвуглерудпром».

Особливою заслугою В.М. Винославського є організація роботи зі створення матеріально-технічної бази факультету. В цей час Радою Міністрів УРСР були ухвалені рішення про фінансування будівництва корпусу та гуртожитку для студентів. В 1974 році будівництво навчального корпусу факультету та гуртожитку було закінчено. Навчальний корпус № 22 (нині – Інститут енергозбереження та енергоменеджменту) є пам'яткою всьому тогочасному колективу факультету і особисто його декану – професору Винославському В.М.

За участь у бойових діях та значні трудові досягнення В.М. Винославський нагороджений орденами Пошани, Жовтневої Революції, Вітчизняної Війни першого ступеня та 11 медалями.

Професор В.М. Винославський викладав дисципліни: «Електропостачання підприємств», «Підстанції і мережі», «Вступ до спеціальності» та ін. Ним опубліковано 126 наукових праць, зокрема – монографія «Расчёт электрических распределительных сетей», чотири навчальні видання з грифом Мінвузу України. В 2005 році Василь Миколайович за підручник «Переходные процессы в системах электроснабжения» отримав (посмертно) звання лауреата Державної премії України в галузі науки і техніки.

Слід відмітити, що успіхи колективів кафедри та факультету, які очолював професор Винославський В.М, були обумовлені не лише його високим професіоналізмом, але й людськими якостями, створенням в колективі творчих, робочих, дружніх і доброзичливих стосунків. Властиві йому людяність, справедливість, відкритість, сердечність, висока внутрішня культура, чуйність, небайдужість до людей, які працюють поряд, турбота про них поєднувалися з вимогливістю насамперед до себе. Василь Миколайович був мудрою людиною, умів чути людей, був уважний до чужої думки, для нього було характерним гостре відчуття реальності, не любив читати нотації, докоряти за дрібниці – звертався до совісті. Студенти з любов'ю називали свого декана «Папа Вася». Він жив за принципами: жити, мріяти, любити, бути оптимістом, робити людям добро.

Давно немає поряд з нами Василя Миколайовича Винославського, але пам'ять про цю чудову людину назавжди залишиться в наших серцях.

Денисюк С.П.
директор ІЕЕ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ

Для подання рукопису до журналу автори повинні дотримуватись всіх встановлених вимог, які вказані нижче.

У разі невідповідності поданих матеріалів статті пунктам цих вимог, а також якщо вони не відповідають тематиці наукового журналу, редакція повертатиме авторам матеріали на доопрацювання!

Обсяг статті

Загальний обсяг статті – від 6 до 10 сторінок формату А4. Сторінки повністю заповнені текстом. Схеми, рисунки, таблиці й формули повинні бути пронумеровані та розміщені в тексті після посилань на них. Матеріал має бути викладений стисло, без повторювань даних таблиць і рисунків у тексті. Неприпустимо використовувати елементи форматування як «розрив розділу з нової сторінки» та колонтитули.

Стаття має бути ретельно перевірена авторами та відповідати всім пунктам вимог до оформлення!!!!

Текстовий редактор

Стаття набирається в текстовому редакторі Microsoft Word (версії 2007 та вище) і зберігається з розширенням *.doc або *.docx.

Обов'язково надсилається стаття, збережена у форматі *.pdf !!!

Загальне оформлення:

1) Мова. Статті приймаються до друку трьома мовами: українською, російською, англійською.

2) Параметри сторінки:

- Поля: зліва, справа, зверху, знизу – **2,5 см.**
- Вирівнювання основного тексту – **за шириною.**
- Перші рядки всіх абзаців – **з відступом 1,0 см!!!**
- Шрифт – **Times New Roman, кегль 10, міжрядковий інтервал 1.**
- Назва статті друкується великими (Caps Lock) напівжирними літерами (Ж) – **кегль 14.**
- Заголовки елементів основного тексту (Вступ, Мета та завдання тощо) виділяються напівжирним шрифтом (Ж).

3) Структура статті:

- **номер УДК** (у верхньому лівому кутку сторінки, напівжирним шрифтом кегль 10)
- **прізвища авторів** (приклад: **І.І. Петренко** (укр.), **И.И. Петренко** (рос.) **I. Petrenko** (англ)) та відомості про авторів (науковий ступінь, вчене звання); **індекс ORCID – обов'язково;**
- **(Порядок оформлення наукових ступенів та вчених звань описано нижче в цьому ж документі в розділі «Рекомендовані скорочення вчених звань і наукових ступенів»).**
- **повна назва організації** (навчального закладу, установи) – **вирівнювання за правим краєм;**
- **реферат обсягом від 1000 до 1100 знаків** повинен відображати короткий зміст статті, не повторювати назву, не містити загальних фраз та бути структурованим (мета дослідження, методика реалізації, результати дослідження, висновки). В англійській версії статті наводяться реферат **обсягом 1700-2000 знаків,**
- **ключові слова:** (6–8 слів), словосполучення «Ключові слова» – напівжирним + курсив.

Відповідно до постанови Президії ВАК України № 7-05/1 від 15.01.2003р. до друку приймаються наукові статті, що мають такі елементи:

Основний текст статті

Вступ (постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими або практичними завданнями; аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми, на які спирається автор; виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, яким присвячується зазначена стаття);

Мета та завдання (формулювання цілей статті, постановка завдання);

Матеріал і результати досліджень (виклад основного матеріалу дослідження, з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів, з можливим поділом на частини з відповідними назвами);

Рисунки (діаграми, фото тощо) подаються у **чорно-білому зображенні** разом із текстом, після посилань на них. **Вимога до графічних матеріалів:** будь-яка ілюстрація повинна бути єдиним нерозривним графічним об'єктом. Рекомендується застосування растрових форматів з роздільною здатністю **не менше 300 dpi**. Рисунок має бути розташований **у центрі, без обтікання текстом**. Підписи до рисунків повинні містити нумерацію в порядку розміщення в тексті та пояснювальний підпис. Неприпустимо включати підписи до самого рисунка. **Рисунок не повинен займати всю площу аркуша!!!**

Крапки після назви структурних частин статті не ставити.

Графіки повинні містити підписи усіх осей на самому рисунку. Будь-який інший вигляд підпису розглядатись та виправлятись не буде!

Таблиці. При заповненні слід користуватись шрифтом 10 кеглю. Кожна таблиця повинна мати порядковий номер та назву і розташовуватись після посилання на неї у тексті статті. Якщо таблиця не вміщується на сторінці або виходить на іншу, слід використати позначення «Продовження табл.».

Формули повинні бути набрані за допомогою редактора формул **Math Type (версія 6.8 і вище)** або внутрішній редактор формул у Microsoft Word з розмірами: звичайного символу – 11, великого індексу – 10, малого індексу – 9. Кириличні та грецькі символи мають бути набрані прямим шрифтом, латинські літери – похилим. Виняток становлять символи операторів і стандартних функцій, які набираються прямим шрифтом. Нумерація формул, на які є посилання в тексті, – справа в дужках. Цілі частини від десяткових відокремлюються комою **Одиниці розмірності можна набирати окремо від формул, або у формулах, з обов'язковим використанням проміжку.**

Висновки:(навести основні висновки з дослідження та перспективи його подальшого розвитку в цьому напрямку).

Список використаної літератури наводиться в порядку посилань у тексті, відповідно до ДСТУ 8302:2015.(укр) Посилання на літературні джерела в тексті наводяться у квадратних дужках.

Список використаних літературних джерел подається двічі: мовою оригіналу відповідно до ДСТУ 8302:2015.(укр, рос) і англійською, відповідно до вимог IEEE style

У разі відсутності або низького рівня перекладу англійської версії списку використаної літератури (References) стаття буде повернута на доопрацювання!!!

Для надання відомостей про авторів англійською, або російською мовами, слід використовувати загальноприйнятну лексику перекладу наукових ступенів, вчених звань, посад (описано в розділі «Рекомендовані скорочення вчених звань і ступенів»).

Англійська анотація за обсягом рекомендується більшою за українську (російську) 1700-к2000 знаків, оскільки для закордонних вчених анотація є, як правило, єдиним джерелом інформації про зміст статті.

У разі відсутності або низького рівня перекладу англійської анотації (в Google Translate та ін.) стаття буде повернута на доопрацювання!!!

В окремому файлі подаються відомості про авторів у вигляді анкети:

(Анкети подаються 3 мовами (укр., англ. та рос.). Вказується повна назва організації або установи, вказати місце де працює автор. Якщо всі автори статті працюють або навчаються в одній установі, можна не вказувати місце роботи кожного автора окремо.)

Прізвище, ім'я, по-батькові автора (повністю, без скорочень)	
Вчений ступінь, вчене звання, посада	
Місце роботи кожного автора в називному відмінку (повна назва без скорочень)	
Поштова адреса місця роботи, з поштовим індексом	
Контактний телефон	
Електронна адреса	
ORCID	

Відповідальність за зміст статті несуть автори. Остаточне рішення щодо друку статей ухвалює редколегія. Редакція залишає за собою право проводити редакційну правку статей.

Редакція журналу здійснює перевірку на плагіат за допомогою спеціального програмного забезпечення!!!

Статті, які не відповідають вимогам редакції журналу "Енергетика: економіка, технології, екологія" та не пройшли перевірку на плагіат, будуть повернуті на доопрацювання.

Увага!!! На електронну адресу журналу надсилається:

- стаття версія в форматі *.doc або *.docx;
- стаття версія в форматі *.pdf (ОБОВ'ЯЗКОВО);
- анкета відомостей про авторів;
- акт експертизи про можливість оприлюднення матеріалів у засобах масової інформації.

Контакти:

- тел.: +38(044) 204-82-37;
- сайт: <http://energy.kpi.ua>;
- e-mail: kravkpi@ukr.net