



ISSN 1727-9895

ISSN 2786-7064 (online)

Праці

Інституту електродинаміки

Національної академії наук

України

Збірник наукових праць

Випуск

69

Київ

2024

Відділення фізико-технічних проблем енергетики
Національної академії наук України
Інститут електродинаміки

ПРАЦІ

Інституту електродинаміки Національної академії наук України

Збірник наукових праць

Виходить тричі на рік

Засновано у 1999 році

**Випуск
69**

Київ
2024

ПРАЦІ ІНСТИТУТУ ЕЛЕКТРОДИНАМІКИ НАН УКРАЇНИ

Редакційна колегія*:

Шаповал І.А.	головний редактор, докт. техн. наук
Жаркін А.Ф.	академік НАН України
Кириленко О.В.	академік НАН України
Стогній Б.С.	академік НАН України
Шидловський А.К.	академік НАН України
Щерба А.А.	академік НАН України
Кондратенко І.П.	член-кор. НАН України
Кузнецов В.Г.	член-кор. НАН України
Михальський В.М.	член-кор. НАН України
Шидловська Н.А.	член-кор. НАН України
Буткевич О.Ф.	докт. техн. наук
Васецький Ю.М.	докт. техн. наук
Кенсичський О.Г.	докт. техн. наук
Липківський К.О.	докт. техн. наук
Зварич В.М.	докт. техн. наук
Мельник В.Г.	докт. техн. наук
Петухов І.С.	докт. техн. наук

Editorial board*:

I.A. Shapoval	Editor-In-Chief, Doctor of engineering sciences
A.F. Zharkin	Academician of the NAS of Ukraine
O.V. Kyrylenko	Academician of the NAS of Ukraine
B.S. Stognii	Academician of the NAS of Ukraine
A.K. Shydlovskiy	Academician of the NAS of Ukraine
A.A. Shcherba	Academician of the NAS of Ukraine
I.P. Kondratenko	Corresponding Member of the NAS of Ukraine
V.G. Kuznetsov	Corresponding Member of the NAS of Ukraine
V.M. Myhalskyi	Corresponding Member of the NAS of Ukraine
N.A. Shydlovska	Corresponding Member of the NAS of Ukraine
O.F. Butkevych	Doctor of engineering sciences
Yu.M. Vasetskyi	Doctor of engineering sciences
O.G. Kensytskyi	Doctor of engineering sciences
K.O. Lypkivskiy	Doctor of engineering sciences
V. M. Zvaritch	Doctor of engineering sciences
V.G. Melnyk	Doctor of engineering sciences
I.S. Petuhov	Doctor of engineering sciences

*Члени редакційної колегії працюють у Інституті електродинаміки НАН України, Київ
Editorial board members work in the Institute of electrodynamics of the NAS of Ukraine, Kyiv

International editorial board:

V.Yu. Rozov, Corresponding member of the NAS of Ukraine, the Science and Technology Center of Magnetism of Technical Objects, Kharkiv
V.S. Maliar, Doctor of engineering sciences, Lviv Polytechnic National University, Lviv
V.V. Rymsha, Doctor of engineering sciences, National Polytechnic University, Odesa
Bendahmane Boukhalfa, Doctor of Engineering Sciences, University of Béjaïa, Algeria
M. Pavlik, Member of NAS Ukraine, Technical University of Lodz, Poland
Yu.R. Plotkin, Doctor of Engineering Sciences, Berlin School of Economics and Law

Збірник включений до Переліку наукових фахових видань України (категорія «Б») наказом МОН № 975 від 11.07.2019. та представлений у таких системах реферування:

- загальнодержавному депозитарії «Наукова періодика України»;
- загальнодержавній базі даних «Україніка наукова» (реферативний журнал «Джерело»);
- науковій електронній бібліотеці періодичних видань НАН України (NA SPLIB) (<http://www.dspace.nbuv.gov.ua>);
- каталозі журналів відкритого доступу (DOAJ).

У червні 2021 р. збірник «Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України» включений у довідник періодичних видань бази даних Ulrich's Periodical Directory (New Jersey, USA). У збірнику здійснюються експертне рецензування та наукове редагування статей.

*Друкується за постановою Вченої ради
Інституту електродинаміки Національної академії наук України.
Протокол № 12 від 14 листопада 2024 року*

Зареєстровано 07.02.2002. Свідоцтво: серія КВ, № 5843.

Засновник та видавець: Інститут електродинаміки НАН України
Україна, 03057, м. Київ, пр. Берестейський, 56

Адреса редакції:

03057, м. Київ, пр. Берестейський, 56, Інститут електродинаміки НАН України.
Тел. (044) 366-26-56 E-mail: mlyv@ied.org.ua; Адреса сайту: <http://prc.ied.org.ua>

ISSN 1727-9895

ISSN 2786-7064 (online)

© Інститут електродинаміки НАН України, 2024

Відділення фізико-технічних проблем енергетики
Національної академії наук України
Інститут електродинаміки

Праці
Інституту електродинаміки
Національної академії наук України

Випуск 69

2024 р.

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2024.69>

ЗМІСТ

ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНІ КОМПЛЕКСИ ТА СИСТЕМИ

- Жаркін А.Ф., Пазєєв А.Г., Бондар О.І.* Визначення оптимальної геометрії обмотки індуктора, що призначений для нагріву внутрішніх кілець буксових підшипників колісних пар вагонів метрополітену5
- Пеньковий Т.О., Бондар О.І., Гориславець Ю.М.* Тривимірне моделювання електромагнітних і гідродинамічних процесів у відбивній печі для алюмінію з електровихровою камерою12

ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА РИНКИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

- Парус Є.В., Блінов І.В., Костіков А.О.* Оцінювання ефективності роботи малого модульного ядерного реактора на ринку електричної енергії.....19
- Буткевич О.Ф., Гурєєва Т.М., Юнєєва Н.Т.* Питання розроблення моделей системної автоматики для дослідження аварійних режимів електроенергетичних систем.....29
- Олефір Д.О., Парус Є.В., Рибіна О.Б., Мірошник В.О.* Оптимізація добового графіку роботи гідроелектростанції з урахуванням нелінійної функції витрат на власні потреби.....36
- Денисюк С.П., Белоха Г.С., Гілевич К.М., Чернечук І.С.* Моніторинг ефективності роботи в локальних електроенергетичних системах.....46
- Дунаєвська Н.І., Євтухов В.Я.* Практичне значення наявної інфраструктури науково-експериментального комплексу в сучасних процесах реформування енергетичної галузі країни56

ТЕОРЕТИЧНА ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОФІЗИКА

- Кучерява І.М.* Електричне поле у зшити-поліетиленовій кабельній ізоляції з ексцентричністю та дефектом напівпровідного екрана65
- Кришук Р.С.* Електростатичне поле в камері бар'єрного розряду для очищення води з урахуванням окремих водних крапель.....72

ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ КОМПЛЕКСИ ТА СИСТЕМИ

- Мазуренко Л.І., Джюра О.В., Шихненко М.О., Білик О.А.* Асинхронні генератори в автономних джерелах живлення зварювальної дуги. Стан і перспективи.....83
- Акинін К.П., Кіреєв В.Г., Петухов І.С., Філоменко А.А.* Електромеханічні характеристики безконтактного двигуна з постійними магнітами при широтно-імпульсному живленні95
- Шуруб Ю.В., Цицюрський Ю.Л.* Алгоритми програмної реалізації цифрових статистично оптимальних регуляторів асинхронних електроприводів із стохастичними навантаженнями.....105

НАПІВПРОВІДНИКОВІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

- Голубєв В.В., Губаревич В.М., Зозульов В.І., Маруня Ю.В., Сторожук А.І.* Способи підвищення ефективності імпульсних пристроїв силовій електроніки.....113

ВИМІРЮВАННЯ ТА ДІАГНОСТИКА В ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЦІ

- Левицький А.С., Зайцев Є.О., Рассовський В.Л., Закусило С.А.* Розрахунок похибки ємнісного сенсора повітряного проміжку в гідрогенераторах з системою компланарних електродів зумовленої перекосом.....119

CONTENTS

ELECTROTECHNOLOGICAL COMPLEXES AND SYSTEMS

- A.F. Zharkin, A.H. Paziiev, O.I. Bondar** Design of the optimum geometry of the inductor winding for heating the inner rings of axle bearings in wheel pairs of carriers in the metro5
- T.O. Penkovi, O.I. Bondar, Yu.M. Goryslavets** Three-dimensional simulation of electromagnetic and hydrodynamic processes in a reverberatory furnace for aluminum with an electric vortex chamber12

ELECTRIC POWER SYSTEMS AND ELECTRICITY MARKETS

- E.V. Parus, I.V. Blinov, A.O. Kostikov** Assessment of the efficiency of small modular nuclear reactor on the electricity market19
- O.F. Butkevych, T.M. Hurieieva, N.T. Yunieieva** The issues of the system automation models development for power systems fault condition study29
- D. Olefir, E. Parus, O. Rybina, V. Miroshnyk** Daily optimization of the working schedule of the hydroelectric plant taking into account the nonlinear function of the costs of own needs.....36
- S. Denysiuk, H. Bielokha, K. Hilevich, I. Cherneshchuk** Monitoring of the efficiency in local electricity systems.....46
- N.I. Dunayevska, V.Ya. Yevtukhov** The practical significance of the existing infrastructure of the scientific and experimental complex in modern processes of reforming the energy industry of Ukraine56

THEORETICAL ELECTRICAL ENGINEERING

- I.M. Kucheriava** Electric field in cross-linked polyethylene cable insulation with eccentricity and semiconductor screen defect.....65
- R.S. Kryshchuk** Electrostatic field in a barrier discharge chamber for water purification considering individual water droplets72

ELECTROTECHNICAL COMPLEXES AND SYSTEMS

- L.I. Mazurenko, O.V. Dzhura, M.O. Shykhnenko, O.A. Bilyk** Asynchronous generators in autonomous power sources for welding arc. state and prospects83
- K.P. Akinin, V.G. Kireyev, I.S. Petukhov, A.A. Filomenko** Electromechanical characteristics of a brushless permanent magnets motor when pulse-width supply95
- Yu.V. Shurub, Yu.L. Tsitsyurskiy** Algorithms for the program implementation of digital statistically optimal regulators of induction electric drives with stochastic loads.....105

SEMICONDUCTOR CONVERTERS

- V.V. Golubev, V.M. Gybarevich, V.I. Zozulev, Yu.V. Marunia, A.I. Storozhuk** Methods of increasing the efficiency of pulse power electronics devices.....113

MEASUREMENTS AND DIAGNOSTICS IN THE ELECTRIC POWER INDUSTRY

- A.S. Levitskiy, Ye.O. Zaitsev, V.L. Rassovskiy, S.A. Zakusilo** Calculation of plate skew error of the air gap capacitive sensor in hydrogen generators with a system of coplanar electrodes.....119

Відповідальний секретар С.В. Гаврилюк
Редактор Ю.В. Морозова-Леонова

Включений в Перелік наукових фахових видань України, категорія «Б».

ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНІ КОМПЛЕКСИ ТА СИСТЕМИ

УДК 621.365.51

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2024.69.005>

ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ ГЕОМЕТРІЇ ОБМОТКИ ІНДУКТОРА, ЩО ПРИЗНАЧЕНИЙ ДЛЯ НАГРІВУ ВНУТРІШНІХ КІЛЕЦЬ БУКСОВИХ ПІДШИПНИКІВ КОЛІСНИХ ПАР ВАГОНІВ МЕТРОПОЛІТЕНУ

А.Ф. Жаркін*, акад. НАН України, **А.Г. Пазєєв****, канд. техн. наук, **О.І. Бондар*****, канд. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна
e-mail: pazeev@ied.org.ua

Досліджено процес високочастотного індукційного нагріву внутрішніх кілець буксових підшипників перед демонтажем, що проводиться під час ремонтних робіт колісних пар вагонів метрополітену. Проведено фізичне моделювання процесу нагріву при частоті 10 кГц та використанні індуктора з трирядного обмоткою у 17 витків, довжина якої дорівнювала довжині кільця. Показано, що при варіюванні часу нагріву та потужності, що передається в деталь, не вдається забезпечити вибір прийняттого режиму нагріву для нормального демонтажа з точки зору забезпечення повторюваності результатів та недопущення локального перегріву деталі. Проведено розрахунки у середовищі COMSOL на скінченно-елементній моделі процесу нагріву кільця буксового підшипника при незмінній кількості витків для різних варіантів геометрії обмотки індуктора, тобто кількість рядів обмотки, кількість витків у ряді та їх розташування відносно внутрішніх кілець підшипників. Показано, що геометрична форма обмотки індуктора має суттєвий вплив на розподіл питомих тепловиділень вздовж поверхні деталей. Визначено оптимізовану геометрію обмотки, за якої забезпечується необхідна динаміка нагріву та відсутність зон локального перегріву кілець підшипників, що дозволяє зменшити частку відбракованих деталей. Бібл. 5, рис. 6, таблиця.

Ключові слова: геометрія обмотки індуктора, динаміка нагріву, електротермічна установка, індукційний нагрів, локальний перегрів.

Вступ. На сьогодні індукційне нагрівання на підвищених частотах з використанням електротермічних установок (ЕТУ) широко використовується в машинобудуванні, металургії, на транспорті та ін. Це пояснюється наявністю таких переваг, як висока концентрація енергії в феромагнітному матеріалі, що нагрівається, безконтактність нагрівання, зручність регулювання та можливість автоматизації електротехнологічного процесу, екологічність виробництва, а також економія енергетичних ресурсів та мінімізація негативного впливу на мережі електропостачання завдяки використанню можливостей сучасних напівпровідникових перетворювачів електроенергії [1].

При використанні ЕТУ для високочастотного індукційного нагріву внутрішніх кілець буксових підшипників перед демонтажем із шийки осі під час ремонту колісних пар вагонів метрополітену постає завдання досягти температури 120...130 °С за час близько 30...45 с. Такий час нагріву визначається умовами технологічного процесу, при якому має місце незначний нагрів валу за рахунок теплопровідності, що полегшує демонтаж кільця [2]. Одночасно необхідно враховувати, що сталь опорного кільця втрачає свої міцнісні властивості при температурі вищій за 160 °С, коли виникають помітні «кольори мінливості». Також важливим є недопущення локальних перегрівів окремих ділянок опорного кільця, так як це може викликати небажані деформації деталей. Зазначені особливості накладають обмеження на рівень потужності, що підводиться до деталі в процесі індукційного нагріву, а також на до-



пустими значення градієнту температури при нагріві для забезпечення рівномірного нагріву поверхні деталі з метою зменшення частки відбракованих деталей.

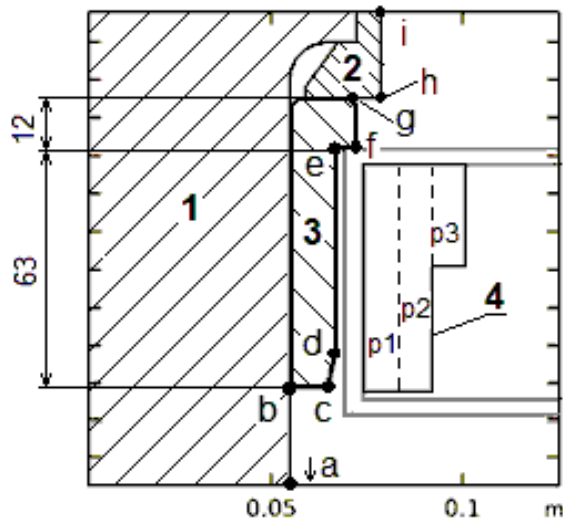


Рис. 1. Геометрія розрахункової області для моделі процесу індукційного нагріву внутрішнього кільця підшипника колісної пари вагону метрополітену

Постановка задачі. Процеси нагріву внутрішнього кільця буксового підшипника колісної пари вагону метрополітену були досліджені при фізичному моделюванні. Ескіз зони нагріву наведено на рис. 1, де в розрізі вздовж осі колісної пари зображені шийка осі (1) на яку насаджено методом гарячого пресування комір букси (2) та внутрішнє кільце буксового підшипника (3). Нагрів здійснювався з використанням індуктора з багатошаровою обмоткою (4), що визначалось конструктивом індуктора та технологічністю його використання, зокрема шириною кільця, природним охолодженням індуктора, необхідністю забезпечити можливість зручної роботи одним оператором при ручному демонтажі кільця. Індуктор був підключений до напівпровідникового перетворювача частоти, що побудований на основі мостового послідовного резонансного інвертора. Регулювання вихідної

потужності перетворювача здійснювалось шляхом регулювання величини вихідного струму [3]. Робоча частота становила 10 кГц. Обмотка індуктора мала 17 витків проводу типу «літцендрат» з перетином по міді 35 мм² у трьох рядах: по 7 витків в рядах p1 і p2, а також 3 витки в ряді p3. У дослідях здійснювався підбір потужності для проведення демонтажу внутрішнього кільця буксового підшипника за час 35...50 с. У точці (d) (рис. 1) контролювалась температура зовнішньої поверхні кільця підшипника, нагрів якого проводився до температури, що не перевищувала 140°C. При використанні індуктора зі вказаною геометрією обмотки стійкого демонтажу внутрішнього кільця підшипнику, тобто повторюваності результату в партії з декількох колісних пар в одному циклі технологічного процесу, досягти не вдалось. При підборі прийнятного режиму (час нагріву та потужність) для однієї з колісних пар при нормальному, без прикладення значних зусиль, ручному демонтажі кільця, в іншому випадку спостерігався зсув кільця приблизно на половину його осьового розміру, з наступним «підклинюванням» на місці посадки. Аналіз процесу демонтажу показав, що відмінності в демонтажі різних кілець можливо пояснити як незначною різницею деформацій місць посадки внутрішніх кілець на шийку осі колісної пари та самих внутрішніх кілець, що спричинені особливостями експлуатації різних колісних пар, так і нерівномірністю нагріву кільця. Було з'ясовано, що менш нагріта область в районі борту кільця має дещо менший внутрішній діаметр, ніж інші частини кільця, що і призводило до проблем при демонтажі. Спроби збільшити діаметр нагрітого кільця в районі «проблемної» області, тобто підвищити її температуру, за рахунок збільшення потужності призводили до локального перегріву середньої та нижньої областей (див. рис. 1) кільця підшипника 3.

Метою роботи є дослідження процесу індукційного нагріву внутрішніх кілець підшипників колісної пари вагону метрополітену з точки зору впливу геометричної форми обмотки індуктора на розподіл питомих тепловиділень вздовж поверхні деталей для визначення оптимальної геометрії обмотки, що забезпечує необхідну динаміку нагріву та відсутність зон локального перегріву кілець підшипників перед демонтажем під час ремонту колісних пар.

Викладення матеріалу. У середовищі COMSOL була розроблена скінченно-елементна модель процесу індукційного нагріву внутрішнього кільця підшипника колісної пари. Геометрія розрахункової області (рис. 1) складається з областей внутрішнього кільця

підшипника (3) та коміра букси (2), що насаджені на шийку осі колісної пари (1), а також індуктора, в якому розміщено обмотку (4) з різними варіантами розташування витків як відносно осі індуктора, так і по шарах обмотки. На рис. 1 схематично показано три шари обмотки 4 для одного з варіантів розміщення витків. Для інших варіантів варіювалась довжина кожного шару обмотки, що відповідало зміні кількості витків у шарі.

Вирішувалися стаціонарна електромагнітна і змінна в часі теплова задачі у 2D постановці. Електромагнітна задача розв'язувалась для всієї розрахункової області, а теплова – тільки для феромагнітних деталей, тобто для шийки осі 1, коміра букси 2 та внутрішнього кільця підшипника 3.

Оскільки задача вирішувалась при заданому струмі індуктора, рівняння електромагнітного поля формулювались для гармонічного випадку відносно комплексних амплітуд векторного магнітного потенціалу $\dot{A}$ та струму в індукторі $\dot{I}$ [4]:

$$j\omega\sigma\dot{A} + \nabla \times ((\mu_0\mu_r)^{-1} \nabla \times \dot{A}) = 0 \quad \text{в областях 1, 2 та 3;} \quad (1)$$

$$\nabla \times (\mu_0^{-1} \nabla \times \dot{A}) = \frac{\dot{I}w}{S} \quad \text{в області індуктора;} \quad (2)$$

$$\nabla \times (\mu_0^{-1} \nabla \times \dot{A}) = 0 \quad \text{в навколишній області,} \quad (3)$$

де ω – кругова частота, σ – питома електропровідність, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, μ_r – відносна магнітна проникність, w – число витків індуктора, S – площа поперечного перерізу індуктора.

Розподіл температури в областях 1, 2 та 3 описується наступними рівняннями:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot \lambda \nabla T = Q, \quad (4)$$

де ρ , C_p , λ – густина, питома теплоємність і теплопровідність матеріалу деталі, Q – середня за період питома потужність тепловиділень внаслідок протікання індуктованих струмів, яка визначається формулою

$$Q = \frac{1}{2} \frac{\dot{J} \cdot \dot{J}^*}{\sigma} = \frac{1}{2} \cdot \omega^2 \sigma (\dot{A}_\varphi \dot{A}_\varphi^*), \quad (5)$$

де $\dot{J} = -j\omega\sigma\dot{A}_\varphi$ – комплексна амплітуда густини наведеного (вихрового) струму, $\dot{A}_\varphi^*$ – комплексна спряжена величина магнітного потенціалу.

На осі симетрії для теплової задачі приймалась гранична умова Неймана $\frac{\partial T}{\partial r} = 0$.

Для кожного з матеріалів були задані свої електро- та теплофізичні властивості. Наявністю контактних електричних опорів між областями 1, 2 та 3 нехтувалося (контакт вважався ідеальним). Багатовиткова структура індуктора замінювалась суцільним неелектропровідним середовищем з заданою азимутальною компонентою густини струму [5]. Це є допустимим наближенням, оскільки обмотка індуктора була виконана проводом типу «літцендрат», який використовується для зменшення впливу таких явищ як скін-ефект і ефект близькості на розподіл струму в перерізі провідника. З огляду на незначну тривалість процесу нагрівання втратою тепла в навколишнє середовище з поверхонь валу, коміру букси та підшипника нехтувалося. Характеристики матеріалів вважались такими, що не залежать від напруженості магнітного поля та температури. Теплопередача через місця посадки деталей на вісь моделювалась сталим коефіцієнтом теплопередачі через площу контакту, так як розрахунки проводились на меншому проміжку часу, ніж необхідний для нагріву кільця підшипника до температури демонтажу. Розрахунки проводились для значень частоти струму 10 кГц, сили струму 90 А. Для всіх варіантів кількість витків обмотки становила 17.

На рис. 2 наведено діаграму розрахованого розподілу питомих тепловиділень вздовж поверхні деталей 1–3 для варіанту розміщення витків обмотки індуктора, що відповідав фізичному моделюванню, тобто для перших двох шарів по 7 витків з довжиною вздовж осі 63 мм та третього шару у 3 витки з довжиною 27 мм. Розрахунки показали, що при наведе-

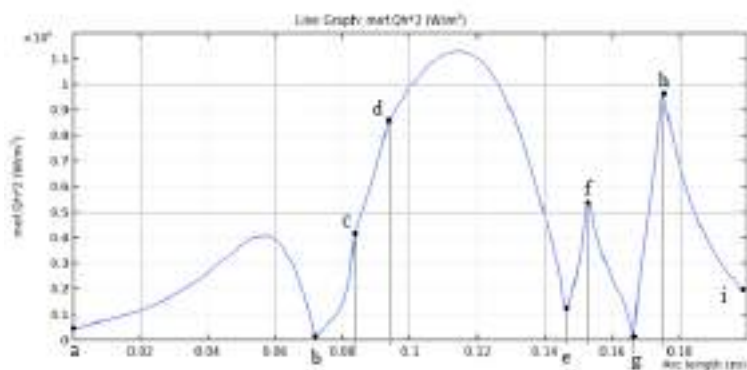


Рис. 2. Розрахований розподіл питомих тепловиділень вздовж поверхні деталей для варіанта геометрії обмотки індуктора, що використовувався при фізичному моделюванні

тепла, а максимум приблизно співпадає з серединою відрізка. В той же час на відрізку $[e-g]$, що відповідає борту кільця, виділяється значно менша кількість тепла.

На рис. 3 показані результати розрахунків температурного поля для зазначеного варіанта геометрії обмотки індуктора при часі нагріву, що становив 20 с. З аналізу результатів розрахунків видно, що в осьовому напрямку в середній частині кільця підшипника спостерігається максимальна температура зовнішньої поверхні кільця, яка становить 322 К. В цій області в площині, що перпендикулярна осі підшипника температура рівномірно спадає в напрямку внутрішньої поверхні кільця, а різниця між температурами зовнішньої і внутрішньої поверхонь кільця підшипника становить 21 К. В той же час максимальна температура буртика кільця, що спостерігається в точці f , становить 305 К, а в площині, що включає точку f і перпендикулярна осі підшипника, більша частина об'єму деталі майже не прогривається, різниця між температурами зовнішньої і внутрішньої поверхонь кільця підшипника становить 11 К. Зрозуміло, що при збільшенні потужності індукційного нагрівача абсолютні значення температури та температурних градієнтів збільшаться, але характер процесів буде повторюватись. А саме буде спостерігатись значний перегрів середньої частини кільця підшипника при недогріві області буртика кільця.

Оскільки розподіл питомих тепловиділень вздовж поверхні кільця підшипнику має суттєво нерівномірний характер, а прогрів деталі «вглиб» відбувається за рахунок теплопровідності, нагрів різних областей кільця в осьовому напрямку відбувається з різною швидкістю. Це призводить до значної різниці температури різних областей кільця в осьовому напрямку в кінці циклу нагріву, коли в найбільш нагрітій області температура досягає верхньої допустимої межі. З аналізу приведених вище розрахунків видно, що найбільш нагрітою є область середини кільця. А найменш нагрітою є верхня крайова область, що відповідає борту кільця.

Збільшити рівномірність нагріву всього об'єму кільця за рахунок використання теплопровідності, одночасно зменшуючи потужність та збільшуючи час нагріву, не вдається. До того ж при збільшенні часу нагріву спостерігався відчутний нагрів шийки осі колісної пари, що

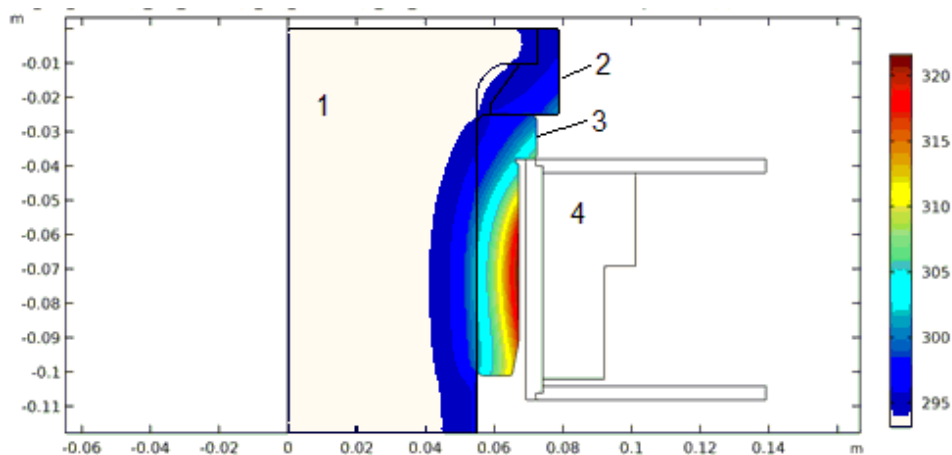


Рис. 3. Розподіл температури для першого варіанта геометрії обмотки

ускладнює демонтаж кільця підшипника з шийки осі.

Було проведено розрахунки процесу індукційного нагріву внутрішнього кільця підшипника для різних варіантів геометрії обмотки індуктора, тобто різних варіантів розміщення витків в обмотці. При цьому кількість витків обмотки не змінювалась. Параметри розглянутих варіантів геометрії обмотки індуктора, а саме дожини рядів обмотки та кількість витків у рядах, які пронумеровані від внутрішнього першого, наведені у таблиці. На рис. 5 та 6 зображено розташування обмотки індуктора 4 відносно внутрішнього кільця підшипника 3 для другого та третього варіантів відповідно. Третій варіант відрізняється від другого тим, що вся обмотка віддалена від кільця на 5 мм та зміщена на 5 мм в напрямку борта кільця таким чином, що частина обмотки розміщується над бортом кільця.

Варіант	Перший ряд, мм/витки	Другий ряд, мм/витки	Третій ряд, мм/витки	Четвертий ряд, мм/витки	Розподіл температури
1	60/7	60/7	27/3	0	рис. 3
2	60/7	51/6	18/2	18/2	рис. 5
3	60/7	51/6	18/2	18/2	рис. 6

На рис. 4 наведено розподіл поверхневої потужності для різних варіантів розміщення витків обмотки. Крива 1 відповідає першому варіанту, а криві 2 та 3 відповідно другому та третьому варіантам геометрії обмотки. Як видно з рисунку, для другого варіанту маємо несуттєве зменшення тепловиділень на відрізку [c-e], який відповідає зовнішній поверхні кільця підшипника, та помірне збільшення тепловиділень на відрізку [e-g], який відповідає борту кільця. Для третього варіанта геометрії обмотки на відрізку [c-e] спостерігається суттєве зменшення тепловиділень, а на відрізку [e-g] – більш суттєве збільшення тепловиділень.

Збільшення тепловиділень в комірці букси (деталь 2) для другого та третього варіантів геометрії обмотки не має негативних наслідків, так як для матеріалу коміра букси максимально можливі температури значно вищі, ніж для матеріалу кільця підшипника. Загалом для третього варіанта розподіл тепловиділень вздовж зовнішньої поверхні кільця підшипника набагато більш рівномірний, ніж для інших варіантів, що повинно сприяти і більш рівномірному прогріву всіх областей внутрішнього кільця підшипника.

Результати розрахунку розподілу температури в кінці нагріву для другого варіанту наведено на рис. 5, а для третього – на рис. 6. З аналізу результатів видно, що для другого варіанта розподіл температури практично повторює такий для першого варіанта, за винятком трохи більшого прогріву зони бурта кільця 3. Водночас розподіл температури в деталях для третього варіанта суттєво відрізняється від першого і другого варіантів і є більш рівномір-

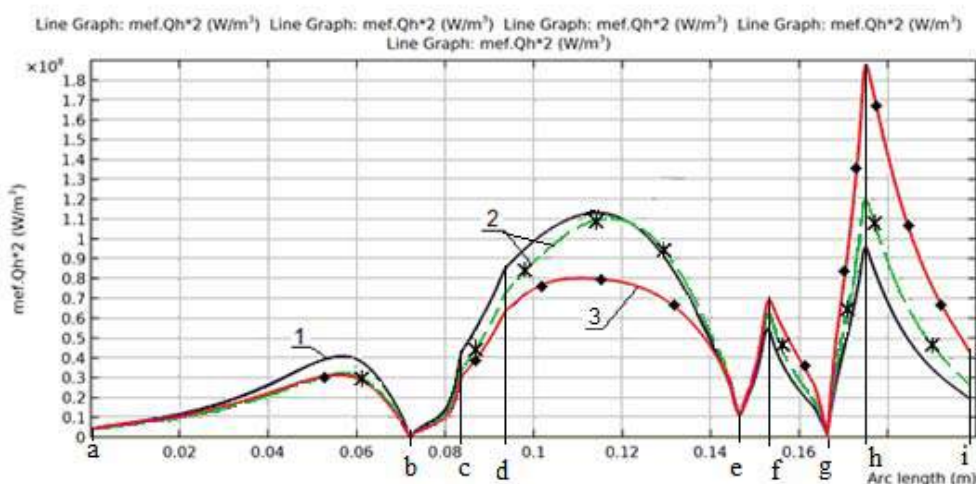


Рис. 4. Розподіл поверхневої потужності вздовж поверхні деталей для різних варіантів розміщення витків обмотки

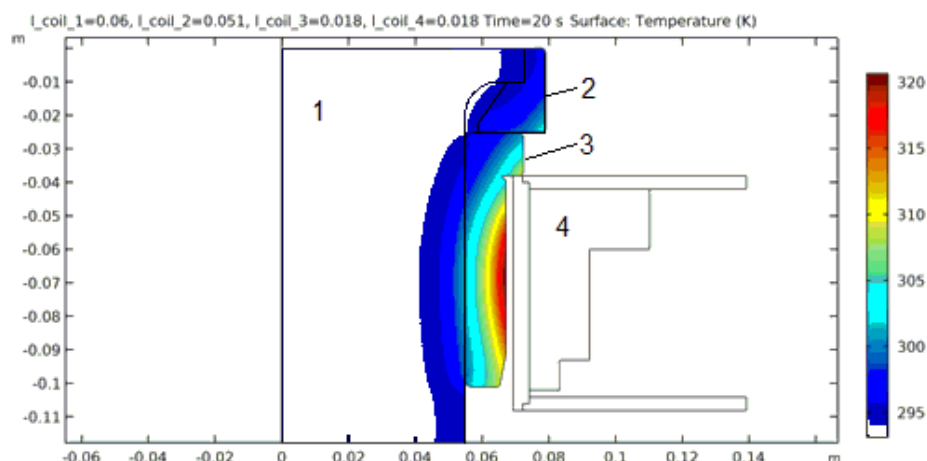


Рис. 5. Розподіл температури для другого варіанту геометрії обмотки

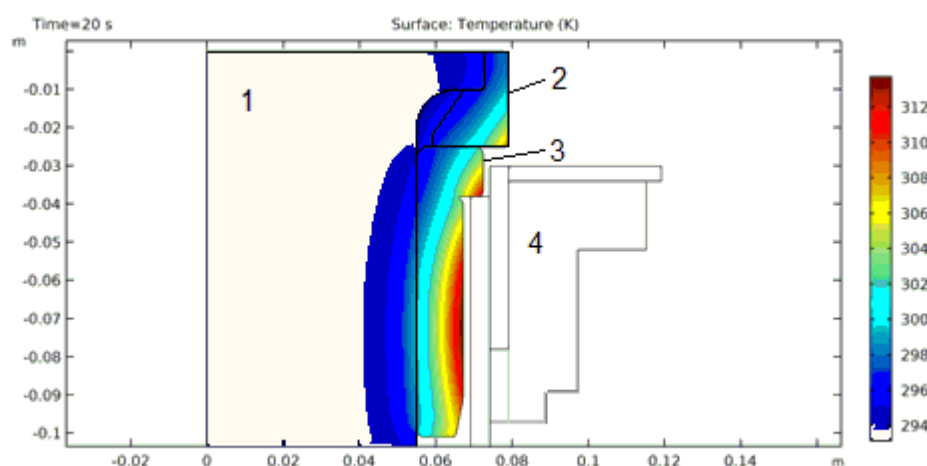


Рис. 6. Розподіл температури для третього варіанту геометрії обмотки

ним. Як слідує з аналізу наведених на рис. 6 результатів, при тих же сумарній потужності та часі нагріву різниця між зовнішньою і внутрішньою поверхнями кільця підшипника в середній, найбільш прогрітій зоні, становить 15 К, причому майже весь об'єм металу під буртом кільця також прогрівається, на відміну від варіантів 1 і 2 геометрії обмотки.

Таким чином встановлено, що при третьому варіанті геометрії обмотки індуктора вдається досягти більш рівномірного розподілу температури по об'єму кільця підшипника, а також меншої різниці між температурами зовнішньої і внутрішньої

поверхонь кільця в середній, найбільш прогрітій зоні, що дозволяє забезпечити необхідну динаміку нагріву та запобігти появі зон локального перегріву кільця підшипника під час ремонту колісних пар вагонів метрополітену.

Висновки. Враховуючи наведені результати, при виготовленні індуктора для нагріву внутрішніх кілець буксових підшипників, було прийнято для реалізації третій варіант геометрії обмотки. Виготовлений індуктор використовується в складі ЕТУ «Нагрівач індукційний НІ-8-20», що призначена для високочастотного індукційного нагріву внутрішніх кілець буксових підшипників та коміра букси перед демонтажем із шийки осі під час ремонту колісних пар вагонів метрополітену серії 81-714 і 81-717 та їх модифікації. ЕТУ використовується на Вагоноремонтному заводі КП «Київський метрополітен». Під час вводу в експлуатацію було визначено параметри технологічного процесу, що дозволило досягти впевненого демонтажу внутрішніх кілець буксових підшипників за час близько 45 с без появи зон локального перегріву кілець.

Фінансується за держбюджетною темою «Розвинення теорії та розроблення заходів і технічних засобів для забезпечення якісного електропостачання в електричних мережах систем розподілу з відновлюваними джерелами енергії» (шифр «Емісія-3»), що виконується за Постановою Бюро ВФТПЕ НАН України від 09.07.2019 р., протокол № 12, КІПКВК 6541030.

1. Електротермічна енергозберігаюча установка для високочастотного індукційного нагріву. А.К. Шидловський, А.Ф. Жаркін, В.Б. Павлов, В.О. Новський, А.Г. Пазєєв, С.О. Палачов, В.Є. Павленко, П.Ц. Бойко, Ю.П. Тугаєнко, Д.О. Малахатка. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*. Київ. 2015. Вип. 41. С. 13–23.

2. Павлов В.Б., Попов А.В., Павленко В.Е. Высокочастотный полупроводниковый источник питания электротехнологических установок. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*. Київ. 2008. Вип. 20. С. 48–49.
3. Гуцалюк В.Я., Зубков І.С. Системи фазового автопідлаштування частоти резонансних інверторів установок індукційного нагрівання за низької добротності коливального контуру. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*. Київ. 2019. Вип. 54. С. 88–94. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2019.54.088>
4. Шидловський А.К., Жаркін А.Ф., Гориславець Ю.М., Новський В.О., Глухенький О.І., Бондар О.І. Дослідження індукційного нагрівання з'єднаних з натягом металевих деталей. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*. Київ. 2018. Вип. 49. С. 60–68.
5. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Мультифизическое моделирование в электротехнике: монография. Киев: Ин-т электродинамики НАН Украины, 2015. 305 с.

DESIGN OF THE OPTIMUM GEOMETRY OF THE INDUCTOR WINDING FOR HEATING THE INNER RINGS OF AXLE BEARINGS IN WHEEL PAIRS OF CARRIERS IN THE METRO

A.F. Zharkin, A.H. Pazeiev, O.I. Bondar

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,

Beresteyskyi ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine

e-mail: pazeiev@ied.org.ua

The process of high-frequency induction heating of the inner rings of bushing bearings before disassembly, which is carried out during the repair work of wheel pairs of subway cars, has been investigated. Physical modeling of the heating process was carried out at a frequency of 10 kHz and using an inductor with a three-row winding of 17 turns, the length of which was equal to the length of the ring. It is shown that when varying the heating time and the power transmitted to the part, it is not possible to ensure the selection of an acceptable heating mode for normal disassembly from the point of view of ensuring repeatability of results and preventing local overheating of the part. Calculations were carried out in the COMSOL environment on the finite element model of the process of heating the ring of a bushing bearing with a constant number of turns for different variants of the geometry of the inductor winding, that is, the number of winding rows, the number of turns in a row and their location relative to the inner rings of the bearings. It is shown that the geometric shape of the inductor winding has a significant effect on the distribution of specific heat emissions along the surface of the parts. The optimized geometry of the winding was determined, which ensures the necessary heating dynamics and the absence of local overheating zones of the bearing rings, which allows to reduce the proportion of rejected parts. Ref. 5, fig. 6, table.

Keywords: geometry of the inductor winding, heating dynamics, electrothermal installation, induction heating, local overheating.

1. Shydlovskiy A.K., Zharkin A.F., Pavlov V.B., Novskiy V.O., Pazeiev A.G., Palachov S.O., Pavlenko V.E., Boyiko P.C., Tugaenko Y.P., Malakhatka D.O. Electrothermal energy saving unit for high-frequency induction heating. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. Kyiv. 2015. Iss. 41. Pp. 13–23. (Ukr)
2. Pavlov V.B., Popov A.V., Pavlenko V.E. High-frequency semiconductor power supply for electrical technology installations. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. Kyiv. 2008. Iss. 20. Pp. 48–49. (Rus)
3. Hutsaliuk V.YA., Zubkov I.S. Phase-locked loop systems of resonant inverters for induction heating installations under low q-factor of the oscillatory circuit. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. Kyiv. 2019. Iss. 54. Pp. 88–94. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2019.54.088>
4. Shydlovskiy A.K., Zharkin A.F., Goryslavets Y.M., Novskiy V.O., Glukhenkyi O.I., Bondar O.I. Investigation of induction heating of connected with tension metal details. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. Kyiv. 2018. Iss. 49. Pp. 60–68. (Ukr)
5. Podoltsev A.D., Kucheryavaya I.N. Multiphysics modeling in electrical engineering. Kyiv: Institute of electrodynamics of NAS of Ukraine. 2015. 305 p. ISBN 978-966-02-7671-0. (Rus)

Надійшла: 20.11.2024

Прийнята: 29.11.2024

Submitted: 20.11.2024

Accepted: 29.11.2024

ТРИВИМІРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ І ГІДРОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У ВІДБИВНІЙ ПЕЧІ ДЛЯ АЛЮМІНІЮ З ЕЛЕКТРОВИХРОВОЮ КАМЕРОЮ

Т.О. Пеньковий*, **О.І. Бондар****, канд. техн. наук, **Ю.М. Гориславець*****, докт. техн. наук
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна
e-mail: yugoris@ukr.net

На основі розробленої математичної моделі проведено тривимірне чисельне дослідження електромагнітних і гідродинамічних процесів у відбивній плавильній печі з електровихровою камерою у вигляді циліндричної камери з дуговим індуктором, яка виконує дві функції: перемішує розплавлений метал у ванні печі та занурює в розплав подрібнений металевий брукхт з подальшим транспортуванням його в плавильну ванну. Досліджено вплив висоти з'єднувальних каналів та кута приєднання до камери натискного каналу на три інтегральні параметри: середню швидкість металу у ванні печі, витрату розплаву через поперечний переріз каналів та середню кутову швидкість металу у вихровій камері. У результаті проведеного моделювання встановлено, що з ростом відносною висоти обох каналів перші два параметри, які характеризують камеру як електромагнітний перемішувач металу у ванні печі, збільшуються, а третій параметр, який визначає її як пристрій для занурювання брукхту, зменшується. Що стосується кута приєднання натискного каналу, то тут навпаки – зі збільшенням кута середня швидкість розплаву у ванні печі та його витрата через канали падають, а середня кутова швидкість металу в камері зростає. Зроблено висновок про те, що на практиці необхідно знаходити (підбирати) такі компромісні значення висоти каналів та кута їхнього приєднання, які б забезпечували реалізацію на заданому рівні обох зазначених функцій. Бібл. 8. Рис. 7.

Ключові слова: відбивна плавильна піч, електровихрова камера, дуговий індуктор, рідкий метал, моделювання електромагнітних і гідродинамічних процесів, з'єднувальні канали, кут приєднання каналів до вихрової камери.

Вступ. Проблема плавки вторинного алюмінію в Україні нині набула особливої актуальності через відсутність первинного виробництва цього металу в країні. Вторинний алюміній зазвичай отримують у результаті переплавлення металевих відходів (алюмінієвого брукхту). Часто для цього використовують технологію, згідно з якою плавлення відходів здійснюють у роторних печах, а приготування необхідних сплавів (з додаванням легуючих елементів) проводять у відбивних (ревербераційних) печах, які є печами з верхнім поверхневим нагріванням [1]. Відома й інша технологія, яка реалізується, наприклад, системою Metaullics LOTUSS (**LOW TURbulence Scrap Submergence**) [2, 3], за якою плавлення алюмінієвих відходів здійснюють у відбивних печах, оснащених вихровою камерою, в якій створюється вихровий (обертальний) рух рідкого металу. Для цього попередньо подрібнений брукхт (шихта) алюмінію подається в зазначену камеру, в якій завдяки створеній гідродинамічній воронці вихрового потоку він затягується (занурюється) в розплав, і далі подається в плавильну ванну печі. Така технологія дає змогу суттєво зменшити окислення та безповоротні втрати металу. За даними іноземних джерел вихід придатного для повторного використання алюмінію за такою технологією сягає 97-98 % [4]. Відома робота [5], в якій представлено результати моделювання гідродинамічних процесів в такій системі з врахуванням меніску, тобто деформації вільної поверхні рідкого металу в камері.

Вихровий потік рідкого металу в такій установці створюється занурюваним відцентровим електромеханічним насосом. Цей насос окрім формування вихрової воронки в камері забезпечує також циркуляцію металу в печі, тобто здійснює перемішування розплаву у ванні, подачу нагрітого в ній металу до вихрової камери та транспортування подрібнених відходів до плавильної ванни печі, забезпечуючи в такий спосіб ефективне плавлення алюмінієвої шихти. Проте наявність механічного насоса знижує надійність і довговічність такого конструктивного рішення через знаходження його ротора (лопатей) в агресивному

середовищі рідкого металу. Для усунення цього недоліку нами було запропоновано створювати такий рух металу в циліндричній камері індукційним способом за допомогою електромагнітних систем, зокрема дугового індуктора (дугового статора), що охоплює зовні вихрову камеру.

На рис. 1 наведено схему відбивної пелі з циліндричною вихровою (електровихровою) камерою 1, в якій за допомогою дугового індуктора 2 створюється вихровий (обертальний) потік рідкого металу. Циліндрична камера двома каналами (всмоктувальним 3 і натискним 4) з'єднана з плавильною ванною 5 пелі. Вихровий потік, що виникає в камері, розділяється в ній на дві частини, одна з яких надходить у ванну плавильної пелі, транспортуючи так подрібнену шихту, перемішує в ній розплав і подає нагрітий метал у вихрову камеру, а інша замикається безпосередньо в самій камері, створюючи в ній вихрову воронку.

У роботі [6] шляхом двовимірного математичного (комп'ютерного) моделювання проведено дослідження електромагнітних і гідродинамічних процесів у відбивній плавильній пелі з такою камерою. Визначено вплив кута приєднання всмоктувального і натискного каналів до бокової циліндричної поверхні вихрової камери на робочі параметри системи, якими виступали середня швидкість рідкого металу у ванні пелі, витрата розплаву через поперечні перерізи з'єднувальних каналів та середня кутова швидкість металу у вихровій камері. За кут приєднання α прийнято кут між віссю каналу і дотичною до циліндричної поверхні камери в точці перетину осі каналу з цією поверхнею (рис. 2). За прийнятих у цій роботі розмірів елементів установки кут α кожного каналу може набувати значень від 33° (тангенційне приєднання) до 90° .

Установлено, що оскільки кут приєднання всмоктувального каналу незначною мірою впливає на роботу камери, то його значення можуть бути будь-якими (від 33° до 90°). А кут приєднання натискного каналу по-різному впливає на ефективність роботи камери. Для отримання максимального перемішування металу у ванні пелі цей кут повинен бути мінімальним, а для досягнення максимального обертального руху металу в камері його значення повинні бути в межах $\alpha \geq 50^\circ$. Оскільки одночасно задовольнити обидві умови (вимоги) на оптимальному рівні неможливо, на практиці рекомендовано приймати компромісне рішення, яке дозволить з одного боку ефективне функціонування вихрової камери як перемішувача, що забезпечує необ-

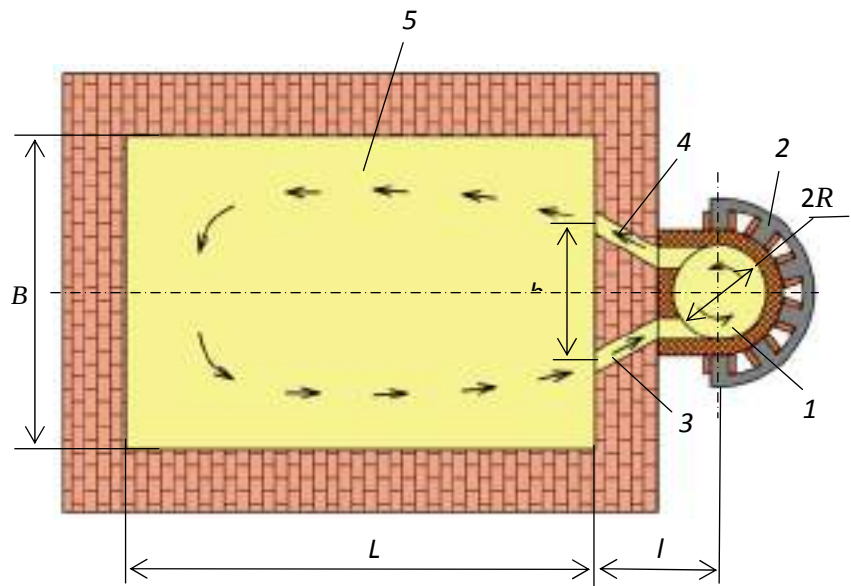


Рис. 1. Схема відбивної пелі з електровихровою камерою

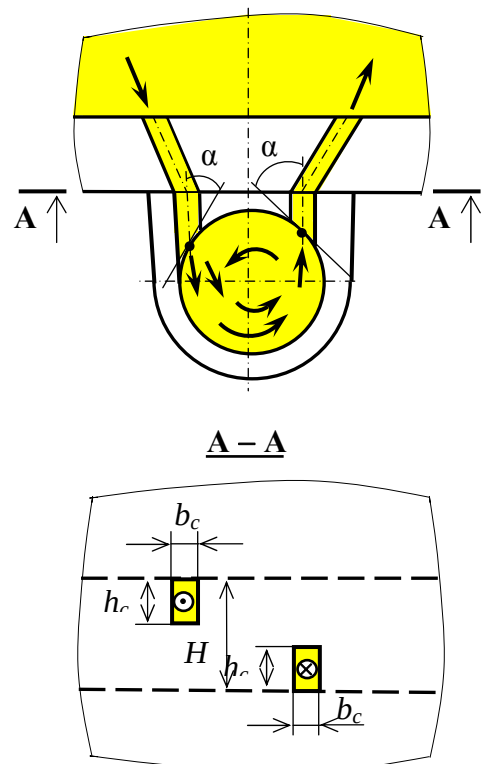


Рис. 2. Позначення кутів приєднання та висоти з'єднувальних каналів

хідну гомогенізацію металу у ванні печі за температурою, а з іншого – як обертового пристрою для створення вихрової воронки заданої інтенсивності. Як один із можливих варіантів, який досліджувався в роботі [4], може бути варіант, за яким кут приєднання натискного каналу знаходиться на рівні 40° , а всмоктувального – 33° (тангенційне приєднання).

Видається доцільним окрім кута приєднання дослідити також вплив висоти з'єднувальних каналів та місця їхнього приєднання до вихрової камери за висотою. Якщо всмоктувальний канал під'єднати до бокової поверхні камери у верхній частині, а натискний – у нижній, ефективність вихрової камери з погляду створення в ній вихрової воронки повинна збільшитись. Розплавлений метал із ванни печі у цьому випадку надходить в камеру зверху, де він розкручується, і залишає її у нижній частині.

Мета цієї роботи – на основі тривимірного моделювання електромагнітних і гідродинамічних процесів у відбивній печі з циліндричною вихровою камерою та дуговим індуктором визначити спільний вплив на ефективність роботи такої печі висоти поперечного перерізу з'єднувальних каналів та кута приєднання натискного каналу до бокової поверхні камери.

Для вирішення поставленої задачі була використана математична модель для чисельного дослідження фізичних процесів у такій установці, яка представлена в роботі [6]. Модель складається із двох частин – систем диференціальних рівнянь, що описують електромагнітні і гідродинамічні процеси. Електромагнітна частина моделі описана диференціальними рівняннями відносно комплексних амплітуд векторного магнітного та скалярного електричного потенціалів. Рівняння представлені у безіндукційному наближенні, тобто без урахування поля, що виникає внаслідок руху рідкого металу в магнітному полі. За результатами розрахунку (отриманими розподілами цих потенціалів) знаходяться значення диференціальних параметрів електромагнітного поля (напруженості і індукції магнітного і електричних полів, густини електричного струму тощо) та інтегральних параметрів електромагнітної системи, таких як напруга, струм, активна, реактивна і повна потужності, потужність тепловиділення в рідкому металі та ін., а також значення електромагнітних сил, що виникають у рідкому металі.

Гідродинамічний процес в моделі представлено усередненою за Рейнольдсом системою диференціальних рівнянь Нав'є-Стокса для турбулентної течії в'язкої рідини. Для замикання цих рівнянь використовувалась k - ϵ модель турбулентності [7]. Гранична умова для цієї задачі задавалась на стінках, що контактують з рідким металом, у вигляді логарифмічного профілю швидкості для приграничного шару.

Представлена математична модель сформульована без урахування деформації вільної поверхні розплаву. У тривимірній постановці вона реалізована в пакеті програмного середовища COMSOL Multiphysics [8].

Постановка задачі. У цій роботі розглядається відбивна піч для плавлення алюмінію з електровихровою камерою у вигляді циліндричної камери з дуговим індуктором (дуговим статором), схему якої з позначеннями основних розмірів наведено на рис. 1. Довжина і ширина плавильної ванни печі $L = 3$ м і $B = 2$ м, висота металу у ванні і в камері – $H = 0,5$ м. Внутрішній діаметр вихрової камери – $2R = 0,6$ м, розмір $l = 0,8$ м, відстань між каналами у ванні печі $b = 0,8$ м, ширина каналів $b_c = 0,1$ м. Дуговий індуктор охоплює зовні половину циліндричної вихрової камери. Його внутрішній діаметр складає $0,8$ м, а висота (по магнітопроводу) – $0,2$ м. Індуктор розташований посередині висоти металу у ванні печі. Моделювання електромагнітного поля, яке він створює, проводилося на частоті 50 Гц. при заданих ампер-витках в котушках, амплітудні значення яких у кожній із них складали по 20 кА. Фазовий кут між струмами сусідніх котушок прийнято рівним 60 ел. град. За такого живлення індуктор створює в камері біжуче (обертове) магнітне поле, яке і викликає обертальний вихровий рух рідкого металу.

Дослідження проводилося для різного положення місця приєднання двох однакових в поперечному перерізі з'єднувальних каналів до камери за висотою, яке мінялося через зміни висоти h_c поперечного перерізу обох каналів при фіксованому положенні верхньої стінки

всмоктувального каналу і нижньої стінки натискного каналу, як це показано на рис. 2, та різних кутів приєднання натискного каналу. Оскільки, як було показано в роботі [6], кут приєднання всмоктувального каналу незначною мірою впливає на роботу вихрової камери, дослідження проводилось при фіксованому тангенційному приєднанні цього каналу.

Оцінка ефективності вихрової камери, так як і в роботі [6], проводилася за допомогою середньої швидкості рідкого металу у ванні відбивної печі $u_{av} = (1/V_b) \int_{V_b} |\mathbf{u}| dV$, де $V_b = L B$

H – об'єм металу у ванні печі, об'ємної витрати металу G через поперечний переріз з'єднувальних каналів та середньої кутової швидкості металу у вихровій камері $\Omega = (1/V_{ch}) \int_{V_{ch}} (u_\varphi / r) dr d\varphi dz$, де $V_{ch} = \pi R^2 H$ – об'єм металу у вихровій камері; r , φ і z –

циліндричні координати камери. Перші два параметри характеризують роботу камери як електромагнітного перемішувача рідкого металу у ванні печі, а третій – як пристрою для занурювання подрібненої шихти в розплав і подачі її в плавильну ванну.

Результати моделювання. Чисельне моделювання електромагнітних і гідродинамічних процесів в представленій системі проводилося в діапазоні відносної висоти каналів $h_c/H = 0,2 \dots 1$ для шістьох значень кута приєднання α натискного каналу: $\alpha_1 = 33^\circ$, $\alpha_2 = 37^\circ$, $\alpha_3 = 40^\circ$, $\alpha_4 = 43^\circ$, $\alpha_5 = 46^\circ$ і $\alpha_6 = 49^\circ$.

На рис. 3 показано розрахункові розподіли швидкості рідкого металу у ванні печі та вихровій камері при тангенційному приєднанні натискного каналу ($\alpha = 33^\circ$) для двох значень відносної висоти каналів $h_c/H = 1$ (рис. 3 а) і $h_c/H = 0,2$ (рис. 3 б). Як видно з цього рисунку, у першому випадку спостерігається більш рівномірний розподіл швидкості металу в плавильній ванні за висотою порівняно з другим випадком, де швидкість металу у верхньому шарі ванни суттєво вища, ніж в інших шарах. Якщо усереднити цю швидкість по всьому об'єму ванни, виявиться, що середня швидкість металу у ванні в першому випадку буде більшою, ніж у другому. Щодо вихрової камери, то в ній навпаки – середня швидкість у другому випадку буде більшою, ніж у першому. Таким чином, зменшення відносної висоти з'єднувальних каналів і розведення за висотою місць їхнього приєднання до бокової стінки камери (всмоктувального каналу зверху, а натискного знизу) призводить до зменшення середньої швидкості рідкого металу в плавильній ванні печі і збільшення швидкості металу у вихровій камері.

Прослідкувати детально за рухом металу в системі можна за допомогою розрахункових траєкторій руху потоку. На рис. 4, як приклад, показано отримані в результаті моделювання такі траєкторії у вихровій камері для $h_c/H = 1$ (рис. 4 а), $h_c/H = 0,6$ (рис. 4 б) і

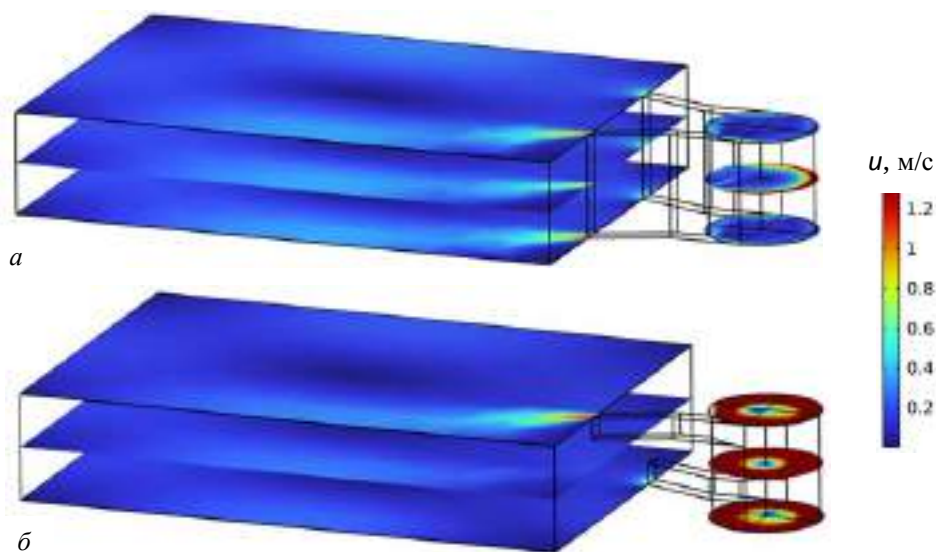


Рис. 3. Розподіли швидкості рідкого металу у ванні та камері печі для відносної висоти каналів $h_c/H = 1$ (а) і $h_c/H = 0,2$ (б)

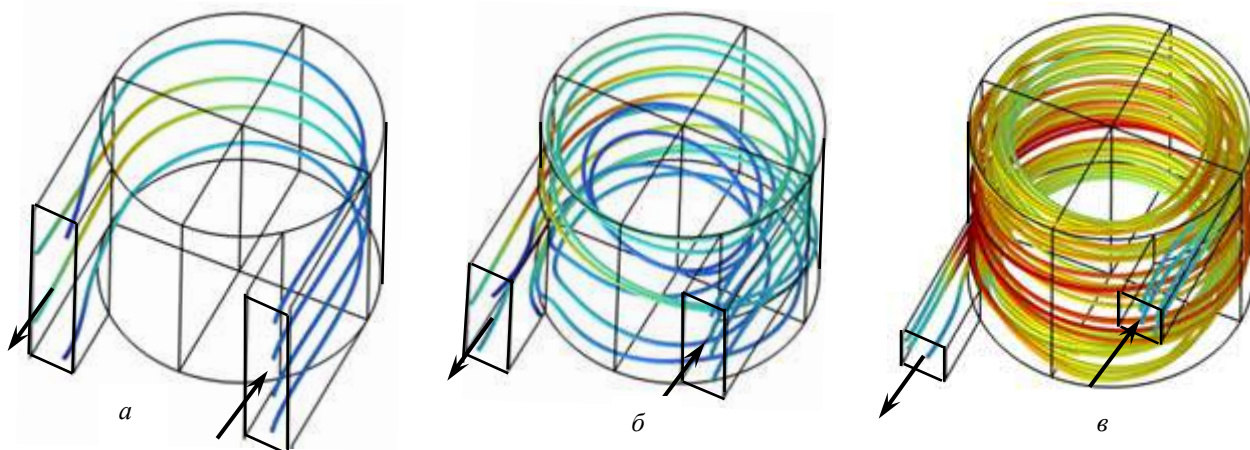


Рис. 4. Траєкторії руху металу у вихровій камері для відносної висоти каналів $h_c/H = 1$ (а), $h_c/H = 0,6$ (б) і $h_c/H = 0,2$ (в)

$h_c/H = 0,2$ (рис. 4 в) при тангенційному приєднанні натискного каналу ($\alpha = 33^\circ$) для чотирьох початкових точок в поперечному перерізі всмоктувального каналу. Очевидно, що зі зменшенням відносної висоти з'єднувальних каналів окрім збільшення швидкості металу в камері збільшується також шлях руху металу в ній. Аналогічні траєкторії потоку отримано і для інших значень кута приєднання натискного каналу.

На рис. 5-7 представлено підсумкові результати чисельного моделювання у вигляді розподілу характерних інтегральних параметрів залежно від відносної висоти з'єднувальних каналів h_c/H для різних значень кута приєднання α натискного каналу. На рис. 5 наведено розподіл середньої швидкості u_{av} рідкого металу у ванні печі, на рис. 6 – об'ємної витрати металу G через з'єднувальні канали, а на рис. 7 представлено розподіл середньої кутової швидкості Ω металу у вихровій камері.

Аналізуючи дані, наведені на цих рисунках, варто зазначити, що всі три параметри, які характеризують ефективність роботи даної системи в цілому, суттєво залежать як від кута приєднання натискного каналу, так і від висоти з'єднувальних каналів. Зі зростанням відносної висоти обох каналів середня швидкість рідкого металу u_{av} у ванні відбивної печі та його витрата G через з'єднувальні канали збільшуються, а середня кутова швидкість металу Ω в камері зменшується. Що стосується кута приєднання натискного каналу, то тут картина зворотна – із збільшенням кута α середня швидкість розплаву у ванні печі та його витрата через канали падають, а середня кутова швидкість металу в камері зростає. Таким чином, оптимальні (максимальні) значення параметрів, які характеризують електровихрову камеру

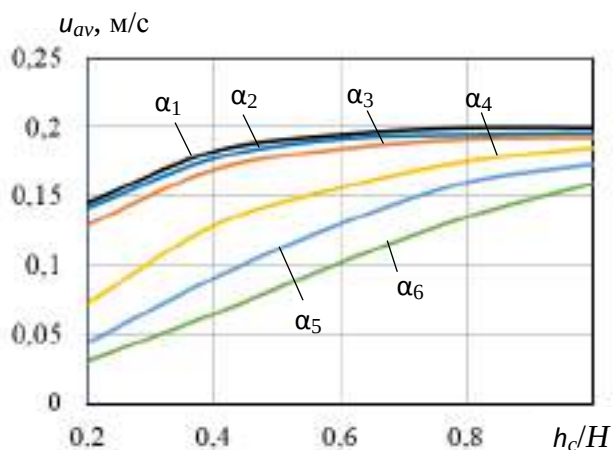


Рис. 5. Середня швидкість рідкого металу у ванні печі в залежності від висоти і кута приєднання натискного каналу

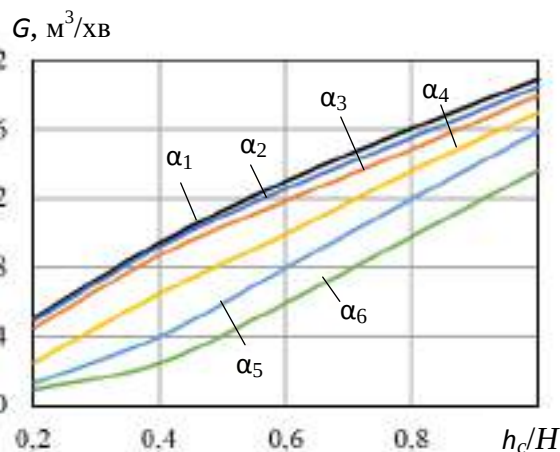


Рис. 6. Витрата металу через канали залежно від висоти і кута приєднання натискного каналу

як електромагнітний перемішувач рідкого металу, досягаються при мінімальному значенні кута приєднання натискного каналу ($\alpha_1 = 33^\circ$) і максимальному значенні відносної висоти обох каналів ($h_c/H = 1$), в той час як оптимальні значення параметра Ω , який характеризує камеру як пристрій для занурювання в метал твердої шихти, досягаються при максимальному куті α і мінімальній висоті каналів.

Ураховуючи такий особливий (полярний) вплив цих параметрів на роботу вихрової камери, для забезпечення ефективного функціонування її в якості як одного, так і другого пристроїв, необхідно у кожному випадку (для кожної плавильної печі) знаходити (приймати) компромісне рішення щодо висоти з'єднувальних каналів та кута приєднання натискного каналу з врахуванням отриманих тут результатів. Знаходження такого рішення може бути полегшено шляхом проведення моделювання теплових процесів у такій системі з урахуванням процесу плавлення твердої шихти в плавильній ванні печі та врахування меніску (деформації вільної поверхні) у вихровій камері, що потребує подальших досліджень у цьому напрямі.

Висновки. У результаті проведеного тривимірного моделювання електромагнітних і гідродинамічних процесів встановлено, що ефективність електровихрової камери відбивною плавильної печі, яка одночасно виконує дві функції, а саме перемішує рідкий метал у ванні печі та створює вихровий обертальний рух розплаву в камері для занурювання металевих шихти в розплав, залежить від відносної висоти з'єднувальних каналів та кута приєднання натискного каналу до циліндричної поверхні вихрової камери. Враховуючи полярний (протилежний) вплив цих параметрів на кожну функцію, на практиці слід приймати компромісне рішення, тобто підбирати (виходячи з отриманих тут результатів) такі значення зазначених параметрів, котрі би водночас задовольняли на заданому рівні дію обох функцій.

Фінансується за кошти держбюджетної теми "Розвиток теорії електротехнологічних процесів та розроблення ефективних електроплавильних і електрозарядних систем з керованим електромагнітним впливом (шифр "Елтех)". Державний реєстраційний номер роботи 0122U000839. КПКВК 6541030.

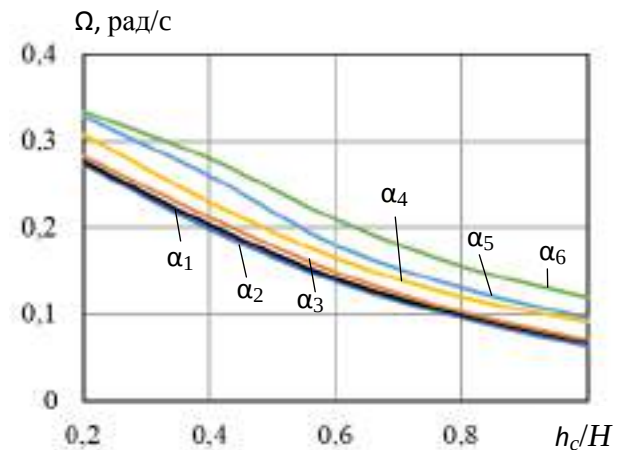


Рис. 7. Середня кутова швидкість металу в камері в залежності від висоти і кута приєднання натискного каналу

1. Гнатуш В. А. Світові тенденції ринку вторинної переробки відходів та брухту алюмінієвих сплавів. *Процеси лиття*. 2020. №3 (141). С. 56–69.
2. <https://www.yumpu.com/xx/document/view/14174965/-lotuss-pyrotek> (дата доступу 01.06.2024).
3. Starczewski R. Developments in scrap submergence technology for light gauge scrap and alloy charging (LOTUSS technology). *20th International Recycled Aluminium Conference*. 19-21 November 2012. Salzburg, Austria.
4. <https://www.youtube.com/watch?v=EwvhukuQ-HQ> (дата доступу 01.06.2024).
5. Bright M., Ilinca F., Hetu J.-F., Ajersch F., Saliba C., Vild C. Fluid modeling of the flow and free surface parameters in the metallurgical lotuss system. *Proceedings of the TMS Annual Meeting*, 2009.
6. Гориславец Ю.М., Пеньковий Т.О. Моделювання відбивною плавильної печі, оснащеною вихровою камерою з дуговим індуктором. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2023. Вип. 65. С. 91–98. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2023.65.091>
7. Ilinca F., Pelletier D. Positivity preservation and adaptive solution of the k-ε model of turbulence. *AIAA Journal*. 1998. 36(1). Pp. 44–50.
8. COMSOL Multiphysics. Simulation Software. URL: <https://www.comsol.com/comsol-multiphysics> (дата доступу 01.06.2024).

HREE-DIMENSIONAL SIMULATION OF ELECTROMAGNETIC AND HYDRODYNAMIC PROCESSES IN A REVERBERATORY FURNACE FOR ALUMINUM WITH AN ELECTRIC VORTEX CHAMBER

T.O. Penkovyi, O.I. Bondar, Yu.M. Goryslavets

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,

Beresteiskiy ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine

e-mail: yugoris@ukr.net

On the basis of the developed mathematical model, a three-dimensional numerical study of electromagnetic and hydrodynamic processes was carried out in a reverberatory melting furnace with an electric vortex chamber in the form of a cylindrical chamber with a curve inductor, which performs two functions: it stirs the molten metal in the furnace bath and immerses the crushed metal scrap in the melt and then transports it to the melting bath. The influence of the height of the connecting channels and the angle of connection to the chamber of the pressure channel on three integral parameters is investigated: the average velocity of the metal in the furnace bath, the melt flow through the cross section of the channels, and the average angular velocity of the metal in the vortex chamber. As a result of the simulation, it was established that with the growth of the relative height of both channels, the first two parameters that characterize the chamber as an electromagnetic stirrer of metal in the furnace bath increase, and the third parameter that defines it as a device for immersing scrap, decreases. As for the angle of connection of the pressure channel, the opposite is true here - with an increase in the angle, the average velocity of the melt in the furnace bath and its flow through the channels decrease, while the average angular velocity of the metal in the chamber increases. It was concluded that in practice it is necessary to find (choose) such compromise values of the height of the channels and the angle of their connection, which would ensure the implementation of both specified functions at a given level. Ref. 8, fig.7.

Keywords: reverberatory melting furnace, electric vortex chamber, curve inductor, liquid metal, modelling of electromagnetic and hydrodynamic processes, connecting channels, angle of connection of channels to the vortex chamber.

1. Hnatush V.A. Global market trends of secondary processing of waste and aluminum alloy scrap. *Protsesyy Lyttia*. 2020. No.3 (141). Pp. 56–69. (Ukr)
2. <https://www.yumpu.com/xx/document/view/14174965/-lotuss-pyrotek> (access date 06/01/2024).
3. Starczewski R. Developments in scrap submergence technology for light gauge scrap and alloy charging (LO-TUSS technology). 20th *International Recycled Aluminium Conference*. 19-21 November 2012. Salzburg, Austria.
4. <https://www.youtube.com/watch?v=EwvhukuQ-HQ> (access date 06/01/2024).
5. Bright M., Ilinca F., Hetu J.-F., Ajersch F., Saliba C., Vild C. Fluid modeling of the flow and free surface parameters in the metaullics lotuss system. *Proceedings of the TMS Annual Meeting*, 2009.
6. Goryslavets Yu.M., Penkovyi T.O. Modelling of a chopper melting furnace equipped with a vortex chamber with a curve inductor. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2023. Issue 65. Pp. 91–98. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2023.65.091>. (Ukr)
7. Ilinca F., Pelletier D. Positivity preservation and adaptive solution of the k-ε model of turbulence. *AIAA Journal*. 1998. 36(1). Pp. 44–50.
8. COMSOL Multiphysics. Simulation Software. URL: <https://www.comsol.com/comsol-multiphysics> (access date 06/01/2024).

Надійшла: 14.08.2024

Прийнята: 28.08.2024

Submitted: 14.08.2024

Accepted: 28.08.2024

ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА РИНКИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

УДК 621.311:681.3

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2024.69.019>

ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ МАЛОГО МОДУЛЬНОГО ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА НА РИНКУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

Є.В. Парус^{1*}, канд. техн. наук, І.В. Блінов^{1**}, докт. техн. наук, А.О. Костіков^{2***}, чл.-кор. НАН України

1 – Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна

2 – Інститут енергетичних машин і систем ім. А. М. Підгорного НАН України,
вул. Пожарського, 2/10, м. Харків, Україна, 61046

e-mail: paruseugene@gmail.com, blinovigor81@gmail.com, kostikov@ipmach.kharkov.ua

Представлено математичну модель побудови оптимального графіка завантаження енергоагрегату з малим модульним ядерним реактором. Визначено основні умови функціонування малих модульних ядерних реакторів з конструктивними рішеннями, подібними до розробки NuScale, та представлено архітектуру математичної моделі пошуку оптимальних графіків їхнього функціонування. Визначено основні атрибути режимів функціонування малих модульних ядерних реакторів та математичну модель для імітації функцій управління графіками функціонування реактора. Визначено основні складові для відображення результатів купівлі/продажу електроенергії енергогенеруючою компанією. Наведено цільову функцію максимізації вигоди від експлуатації малого модульного ядерного реактора та обмеження рентабельності його функціонування. Сформульовано основи методики використання моделі побудови оптимального добового графіка функціонування малого модульного ядерного реактора в задачах оцінки ефекту від будівництва та експлуатації таких реакторів на АЕС. Бібл. 15, рис. 4, таблиця.

Ключові слова: малий модульний ядерний реактор, оптимізація, оцінка економічного ефекту, ринок «на добу наперед».

Вступ. Плани повоєнної відбудови та подальшого розвитку електроенергетики України передбачають впровадження джерел розосередженої генерації, передусім ВДЕ [1, 2]. Водночас у планах розвитку низьковуглецевих декарбонізованих технологій значна увага приділяється також розвитку атомної енергетики [3, 4]. Причому особливий актуальності останніми роками набувають плани децентралізації виробничих потужностей атомних електростанцій впровадженням малих модульних ядерних реакторів (ММР). Тематиці перспектив практичного впровадження технологій ММР присвячено багато публікацій, наприклад [5]. Зокрема в [6] досліджено перспективи та проблеми впровадження ММР в енергосистемах європейських країн. З огляду на запуск в останні кілька років у тестову і промислову експлуатацію перших зразків ММР актуальності набуває і задача оцінки перспектив будівництва та експлуатації міні-АЕС із ММР в ОЕС України. Так, робота [7] присвячена розв'язанню задачі оцінки економічного ефекту від застосування водневих технологій у системах зберігання електричної енергії на міні-АЕС із ММР. Проте основну увагу в [7] зосереджено на оцінці економічного ефекту від експлуатації системи виробництва/спалювання водню за припущення про вже сформований оптимальний графік функціонування ММР. Тому для оцінки інвестиційної привабливості проєктів будівництва та експлуатації міні-АЕС із ММР необхідно також розробити моделі формування оптимальних графіків завантаження ММР із урахуванням особливостей процесів ціноутворення в сегментах ринку електричної енергії України передусім у сегменті ринку «на добу наперед» (РДН).



Мета статті полягає в побудові моделі формування оптимального добового графіка функціонування малих модульних ядерних реакторів для продажу електроенергії на ринку електричної енергії України в задачі оцінки економічного ефекту від будівництва та експлуатації таких реакторів на міні-АЕС.

У складі енергоблоку міні-АЕС ММР фактично здійснює лише перетворення енергії розщеплення ядра в теплову енергію. Проте технічні характеристики енергоблоку міні-АЕС визначаються більшою мірою технічними можливостями ММР. Тому опис математичної моделі виконано з посиланням на значення технічних характеристик ММР. За потреби значення вхідних даних математичної моделі коригуються з урахуванням технічних характеристик іншого устаткування енергоблоку АЕС.

Умови функціонування малого модульного ядерного реактора. Для побудови математичної моделі враховано технічні характеристики ММР компанії NuScale [8]. Номінальна потужність реактора наразі становить 75 МВт. У межах публікації вважаємо, що вся потужність енергоблоку використовується для виробництва електричної енергії, теплофікаційний режим ММР не враховується.

Конструктивні рішення ММР у роботі [8] допускають процедури запуску та зупинки як нормальні режими функціонування установки. Водночас час введення в роботу та виведення в резерв енергоблоку становить приблизно 30 хвилин. Такі періоди зміни станів функціонування енергетичного блоку дають змогу оптимізувати добовий графік завантаження в частині відпуску електроенергії в години з найбільшими ринковими цінами та виведення з роботи в години з низькими ринковими цінами. З іншого боку, при побудові погодинних ставок пропозиції електричної енергії на торги РДН [9] необхідно враховувати час запуску й зупинки ММР на міні-АЕС, коли витрати на власні потреби збільшуються (порівняно з станами «в роботі» та «в резерві»), а потужність корисного відпуску електроенергії суттєво менша за номінальне значення.

Слід також враховувати, що паливні комірки ММР у [8] розраховані на експлуатацію не менше року. Тому при побудові графіка функціонування ММР на міні-АЕС протягом доби обсяг енергоресурсів для виробництва електричної енергії слід вважати невичерпним. Відповідно рішення про запуск ММР зумовлюється економічною доцільністю виробництва електричної енергії за прогнозованих ринкових цін в окремі години доби (оскільки на РДН України прийнятий розрахунковий період у 60 хвилин [10]). І навпаки, рішення про виведення

ММР з роботи зумовлюється збитковістю чи недостатньою рентабельністю виробництва електричної енергії за прогнозованих ринкових цін в окремі години доби.

Архітектура математичної моделі для розв'язання задачі побудови оптимального графіка функціонування ММР на міні-АЕС, у якій враховуються означені умови експлуатації, відображена на рис. 1.

Діаграма станів та переходів означає два основні стани – «в резерві» і «в роботі», а також переходи «запуск» і «зупинка». Для кожного із режимів експлуатації ММР визначаються технологічні і економічні характеристики. Технологічні

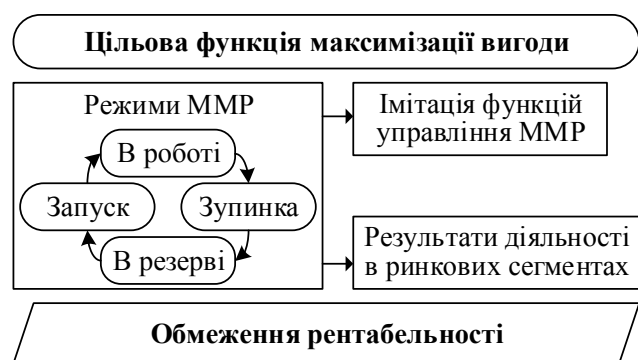


Рис. 1. Архітектура математичної моделі задачі побудови оптимального графіка експлуатації ММР

характеристики режимів експлуатації ММР використовуються процедурою імітації функцій управління при побудові добового графіка роботи ММР. Процедура імітації діяльності енергогенеруючої компанії в ринкових сегментах призначена для розрахунку витрат на закупівлю електричної енергії для покриття електроспоживання власних потреб у різних режимах ММР, а також для оцінки фінансових надходжень від продажу згенерованої електричної енергії.

Цільова функція максимізації вигоди визначає оптимальний час запуску ММР у роботу і зупинки в резерв, за яких вигода, як різниця між фінансовими надходженнями (від продажу електричної енергії) та витратами (на закупівлю електричної енергії для покриття електроспоживання власних потреб), найбільша. Водночас обмеження рентабельності визначає граничну мінімальну за добу суму вигоди від експлуатації ММР, за якої економічно доцільно здійснювати виробництво і продаж електричної енергії.

Розглянемо детальніше кожен з наведених складових математичної моделі побудови оптимального графіка функціонування ММР для виробництва й відпуску електричної енергії.

Атрибути режимів функціонування ММР. Для ідентифікації режимів функціонування ММР на міні-АЕС у межах окремої розрахункової години використовуються бінарні змінні $InWork_h$, $InBeg_h$ та $InEnd_h$. Для окремої години h значення бінарної змінної $InWork_h=1$ визначає функціонування ММР із номінальною потужністю завантаження, а значення $InWork_h=0$ – стан ММР «в резерві». Значення бінарної змінної $InBeg_h=1$ означає режим запуску ММР у розрахункову годину h , а значення бінарної змінної $InEnd_h=1$ означає режим зупинки ММР у розрахункову годину h .

Зазвичай реактори АЕС мають деякі обмежені можливості регулювання потужності в області номінального завантаження, які слід урахувати в задачах планування добових режимів роботи ММР. На етапі оцінки ефекту від будівництва та експлуатації міні-АЕС із ММР в умовах відсутності адекватної інформації про технологічні можливості енергоблоків достатньо обмежитися припущенням про функціонування енергоблоку з ММР із номінальною потужністю завантаження P_{nom} . На етапі проектування міні-АЕС із ММР, зважаючи на розрахункові технічні характеристики устаткування міні-АЕС, можливо враховувати зміну потужності ММР окремо як допоміжну послугу щодо балансування режимів ОЕС України. Для визначення часу функціонування ММР «в роботі» протягом розрахункової години введено додаткову змінну – кількість хвилин роботи ММР із номінальним завантаженням $t_{G,h}$. Тоді обсяг електричної енергії, відпущеної з енергоблоку міні-АЕС, за результатами оптимізації визначається як

$$W_{G,h} = \frac{1}{60} \cdot P_{nom} \cdot t_{G,h} : \forall h = [1..24],$$

де 60 – кількість хвилин у розрахунковій годині, (хв./год.); P_{nom} – номінальна потужність енергоблоку з ММР, (МВт); $t_{G,h}$ – змінна, кількість хвилин функціонування ММР із номінальним завантаженням у розрахункову годину h , (хв.).

Вхідні дані про характеристики ММР визначають оціночний час реалізації процедур запуску та зупинки (у межах математичної моделі вважається, що інше устаткування енергоблоку АЕС не впливає на ці періоди часу). Тоді область визначення часу функціонування ММР із номінальним завантаженням у розрахункову годину h знаходиться в межах

$$\begin{cases} t_{G,h} - InBeg_h \cdot t_B - InEnd_h \cdot t_E - 60 \cdot InWork_h \leq 0 \\ t_{G,h} \geq 0 \end{cases} : \forall h = [1..24],$$

де $InBeg_h$, $InEng_h$ – змінні оптимізації, атрибути режимів відповідно до запуску та зупинки ММР у розрахункову годину h (Boolean); t_B , t_E – час реалізації процедур відповідно до запуску та зупинки ММР, (хв.); $InWork_h$ – змінна оптимізації, атрибут функціонування ММР із номінальним завантаженням у розрахункову годину h , (Boolean).

Крім того, у математичній моделі передбачена можливість урахування обсягів корисного відпуску електричної енергії, відпущеної в режимах запуску і зупинки ММР. Тоді корисний відпуск електричної енергії від енергоблоку міні-АЕС у розрахункову годину h оцінюється за формулою:

$$V_{G,h} = W_{G,h} + W_B \cdot InBeg_h + W_E \cdot InEnd_h : \forall h = [1..24],$$

де W_B , W_E – корисний відпуск електричної енергії у режимах відповідно до запуску та зупинки ММР.

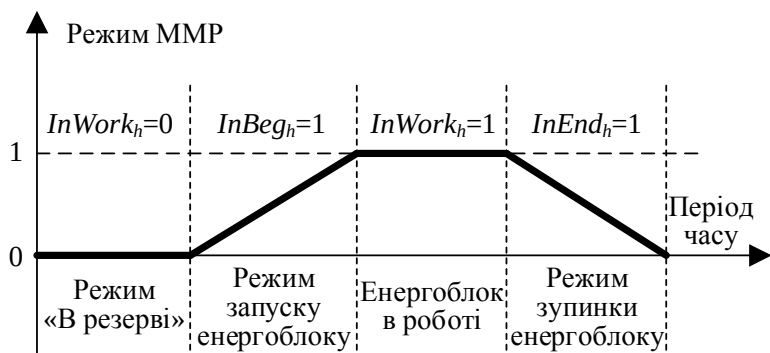


Рис. 2. Принцип протоколювання режиму ММР на кінець розрахункової години

Імітація функцій управління ММР. Використання в математичній моделі атрибутів режимів ММР як змінних зумовлює потребу в узгодженні режимів функціонування ММР у суміжні розрахункові години. З цією метою в математичній моделі ведеться протоколювання режимів у кінці розрахункової години з урахуванням режиму ММР, встановленого в кінці попередньої години за принципами, відображеними на рис. 2.

Для протоколювання змін у режимах роботи ММР на розрахункову годину використовуються значення атрибутів запуску (із додатнім знаком) та зупинки (із від'ємним знаком). Таким чином, область значень протоколу режимів роботи ММР обмежується множиною 0 «в резерві» та 1 «в роботі». Значення режиму функціонування ММР наприкінці розрахункової години h визначається за формулою:

$$M_h = M_{h-1} + InBeg_h - InEnd_h : \forall h = [1..24],$$

де M_{h-1} – режим функціонування ММР наприкінці попередньої розрахункової години ($h - 1$).

Вхідними даними визначається режим функціонування ММР на початок доби (тобто наприкінці попередньої доби) M_0 . Тоді режими функціонування ММР наприкінці кожної розрахункової години h розраховуються за формулою:

$$M_h = M_0 + \sum_{k=1}^h (InBeg_k - InEnd_k) : \forall h = [1..24],$$

де M_0 – режим функціонування ММР на початок доби; $InBeg_k$, $InEnd_k$ – змінні, значення атрибутів режимів відповідно до запуску та зупинки ММР у розрахункову годину k .

Для кожної розрахункової години h множина атрибутів $M_{(h-1)}$ (розраховується з використанням атрибутів за попередні розрахункові години), а також змінних $InWork_h$, $InBeg_h$ і $InEnd_h$ може набувати 16 варіантів значень, зведених у таблиці.

№	$M_{(h-1)}$	$InBeg_h$	$InEnd_h$	$InWork_h$	Допустимий
1	0	0	0	0	1
2	0	0	0	1	0
3	0	0	1	0	0
4	0	0	1	1	0
5	0	1	0	0	1
6	0	1	0	1	1
7	0	1	1	0	1
8	0	1	1	1	1
9	1	0	0	0	0
10	1	0	0	1	1
11	1	0	1	0	1
12	1	0	1	1	1
13	1	1	0	0	0
14	1	1	0	1	0
15	1	1	1	0	1
16	1	1	1	1	1

Шляхом експертних оцінок кожен із наведених у таблиці варіантів значень множини атрибутів режиму ММР оцінений на допустимість. Допустимі варіанти в таблиці відзначені числом 1 у колонці «Допустимий», а не допустимі – числом 0 та сірим фоном. Наприклад, для варіанту № 2 у таблиці атрибут недопустимості встановлено за порушення логіки побудови графіка завантаження ММР: недопустимо активізувати атрибут «в роботі» ($InWork_h=1$) за відсутності активованого режиму запуску ($InBeg_h$) у розрахунковій годині h чи у попередніх розрахункових годинах.

Для відсікання недопус-

тимих варіантів значень атрибутів режиму MMP розроблено систему обмежень:

$$\begin{cases} -20 \cdot M_{h-1} - 20 \cdot InBeg_h + 1 \cdot InEnd_h + 1 \cdot InWork_h \leq 0 \\ 2 \cdot M_{h-1} + 1 \cdot InBeg_h - 20 \cdot InEnd_h - 1 \cdot InWork_h \leq 1 \end{cases} : \forall h = [1..24],$$

Чисельні коефіцієнти системи обмежень підібрано емпірично.

Відображення результатів діяльності генеруючої компанії в ринкових сегментах.

Технологічні процеси експлуатації міні-АЕС із MMP забезпечуються діяльністю енергогенеруючої компанії на ринку електричної енергії. Зокрема, в ринкових сегментах енергогенеруюча компанія здійснює продаж згенерованої електричної енергії та закуповує електричну енергію для покриття електроспоживання власних потреб. Для оцінки ефекту від експлуатації електричної станції з MMP виконується імітація процедури закупівлі електричної енергії в електропостачальника для покриття електроспоживання власних потреб, а також процедури продажу згенерованої електричної енергії в ринкових сегментах.

Українське законодавство не накладає обмежень чи вимог обов'язковості на участь у торгівлі електричною енергією [11]. Тому відпущена електрична енергія може бути продана в організованих ринкових сегментах або за двосторонніми договорами. Крім того, енергогенеруюча компанія може самостійно продавати електричну енергію або делегувати цю функцію іншому учаснику ринку (електропостачальнику, енерготрейдеру чи стороні, відповідальній за баланс у балансуєчій групі). У межах математичної моделі розв'язання задачі оцінки ефекту від експлуатації MMP на міні-АЕС фінансові надходження від продажу згенерованої електричної енергії запропоновано визначати на основі цін у сегменті РДН. Основні складові ціни електричної енергії, за якою розраховуються фінансові надходження для енергогенеруючої компанії, формується з таких основних складових:

$$C_{\text{прод},h}^{\text{MMP}} = C_h^{\text{РДН}} - T^{\text{OP}} - T_{\text{П}}^{\text{ОСП}} - T_{\text{ДУ}}^{\text{ОСП}} - T_{\text{прод}}^{\text{СВБ}} : \forall h = [1..24], \quad (1)$$

де $C_h^{\text{РДН}}$ – прогнозована гранична ціна в сегменті РДН у годину h ; T^{OP} – тариф на послуги оператора ринку; $T_{\text{П}}^{\text{ОСП}}$ – тариф на послуги оператора системи передачі в частині передачі електричної енергії; $T_{\text{ДУ}}^{\text{ОСП}}$ – тариф на послуги оператора системи передачі в частині диспетчерського управління; $T_{\text{прод}}^{\text{СВБ}}$ – маржа сторони, відповідальної за баланс, якій делеговано повноваження продажу електричної енергії.

Закупівля електричної енергії на покриття споживання власних потреб електростанції зазвичай виділяється в окрему процедуру, зокрема з метою зменшення суми платежів за небаланси. Дослідження окремих варіантів закупівлі електричної енергії на покриття електроспоживання власних потреб наведено в [12]. У межах математичної моделі розв'язання задачі оцінки ефекту від експлуатації MMP на міні-АЕС витрати на закупівлю електричної енергії для покриття електроспоживання власних потреб запропоновано визначати на основі цін у сегменті РДН:

$$C_{\text{куп},h}^{\text{MMP}} = C_h^{\text{РДН}} + T^{\text{OP}} + T_{\text{П}}^{\text{ОСП}} + T_{\text{прод}}^{\text{СВБ}} : \forall h = [1..24], \quad (2)$$

де $C_h^{\text{РДН}}$ – прогнозована гранична ціна в сегменті РДН у годину h ; T^{OP} – тариф на послуги оператора ринку; $T_{\text{П}}^{\text{ОСП}}$ – тариф на послуги оператора системи передачі в частині передачі електричної енергії; $T_{\text{прод}}^{\text{СВБ}}$ – маржа сторони, відповідальної за баланс, якій делеговано повноваження закупівлі електричної енергії.

Вибір оптимальних схем закупівлі/продажу електричної енергії здійснюється як окрема задача за наведеними в [12, 13] методиками. Водночас наведена в публікації модель дає змогу оцінювати фінансові баланси енергогенеруючої компанії за результатами виробничої діяльності. У задачі оцінки ефекту від експлуатації MMP на міні-АЕС погодинні ціни продажу (1) та закупівлі (2) електричної енергії розраховуються на етапі підготовки даних до процедури оптимізації.

Функція максимізації вигоди від експлуатації ММР на міні-АЕС.

У математичній моделі використано цільову функцію вибору такого добового графіка функціонування ММР на міні-АЕС, за якого отримується максимум вигоди від згенерованої та проданої електричної енергії. Вигода в цільовій функції розраховується як різниця між фінансовими надходженнями та фінансовими витратами для генеруючої компанії. Фінансові надходження для енергогенеруючої компанії визначаються добутком ціни виручки від продажу електричної енергії (1) на обсяг корисного відпуску електричної енергії в різних режимах функціонування ММР, а саме в режимі запуску ММР, зупинки та завантаження на номінальну потужність. Розглянемо детальніше структуру витрат, пов'язаних із експлуатацією ММР на міні-АЕС.

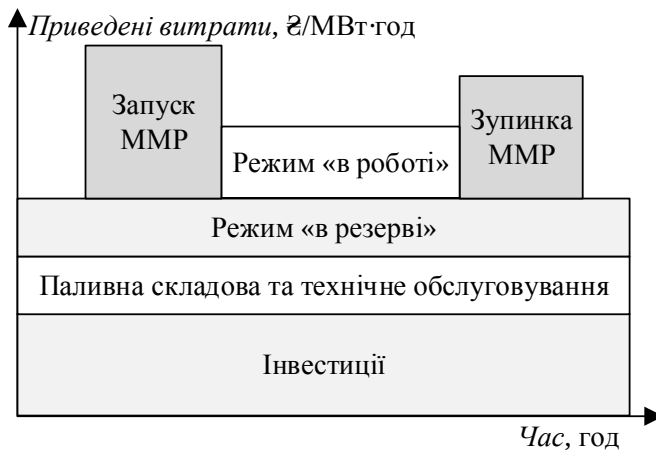


Рис. 3. Структура витрат, пов'язаних із експлуатацією ММР на АЕС

станції та змінну складову, яка залежить від рівнів завантаження генераторів електростанції [14]. До незмінної складової витрат у математичній моделі віднесені інвестиції у міні-АЕС та ММР, витрати на паливні комірки та технічне обслуговування електростанції. Крім того, до незмінної складової витрат віднесені витрати на підтримку стану готовності до запуску ММР. До змінної складової витрат віднесені додаткові витрати, які виникають у режимах запуску ММР, зупинки та функціонування з номінальним завантаженням.

Беззбиткова експлуатація ММР на міні-АЕС забезпечується повною компенсацією незмінної та змінної складових витрат фінансовими надходженнями від продажу електричної енергії:

$$Prof_D^{Sell} \geq Cost_D^{Const} + Cost_D^{Var},$$

де $Prof_D^{Sell}$ – сумарні за добу фінансові надходження від продажу електричної енергії, (€); $Cost_D^{Const}$ – незмінна складова витрат, пов'язаних з експлуатацією ММР на міні-АЕС, приведена до доби, (€); $Cost_D^{Var}$ – змінна складова витрат на реалізацію добового графіка завантаження ММР на міні-АЕС, (€).

Оскільки значення змінної складових витрат та фінансових надходжень безпосередньо залежать від сформованого за результатами оптимізації добового графіка завантаження ММР на АЕС, різниця цих значень використовується як ціль оптимізації. Незмінна складова витрат використовується як обмеження мінімального значення операційного прибутку [15] для забезпечення заданого рівня рентабельності [15]:

$$\begin{cases} \text{Max}(Prof_D^{EBIT}) = Prof_D^{Sell} - Cost_D^{Var} \\ Prof_D^{EBIT} \geq Cost_D^{Const} \end{cases} \quad (3)$$

Фінансові надходження від продажу електричної енергії, згенерованої за результатами реалізації добового графіка завантаження ММР на міні-АЕС, у канонічній формі (змінні оптимізації виділені потовщеним шрифтом):

$$Prof_D^{Sell} = \sum_{h=1}^{24} \left(C_{\text{прод},h}^{\text{ММР}} \cdot W_B \cdot \text{InBeg}_h + C_{\text{прод},h}^{\text{ММР}} \cdot W_E \cdot \text{InEnd}_h + C_{\text{прод},h}^{\text{ММР}} \cdot \frac{P_{\text{ном}} \cdot 1}{60} W_E \cdot t_{G,h} \right).$$

Змінна складова витрат, пов'язаних із реалізацією добового графіка завантаження ММР на міні-АЕС, у канонічній формі (змінні оптимізації виділені потовщеним шрифтом):

$$Cost_D^{Var} = \sum_{h=1}^{24} \left(C_{куп,h}^{MMP} \cdot \Delta W_B^{MMP} \cdot InBeg_h + C_{куп,h}^{MMP} \cdot \Delta W_E^{MMP} \cdot InEnd_h + C_{куп,h}^{MMP} \cdot \frac{\Delta W_G^{MMP}}{60} \cdot t_{G,h} \right),$$

де ΔW_B^{MMP} , ΔW_E^{MMP} – споживання власних потреб MMP у режимах відповідно до запуску та зупинки (МВт·год); ΔW_G^{MMP} – споживання власних потреб MMP за годину функціонування з номінальною потужністю завантаження (МВт·год).

Таким чином, цільова функція вигоди від реалізації добового графіка завантаження MMP на міні-АЕС у канонічній формі матиме вигляд:

$$Prof_D^{Sell} = \sum_{h=1}^{24} \left(\begin{aligned} & \left(C_{прод,h}^{MMP} \cdot W_B - C_{куп,h}^{MMP} \cdot \Delta W_B^{MMP} \right) \cdot InBeg_h \\ & + \left(C_{прод,h}^{MMP} \cdot W_E - C_{куп,h}^{MMP} \cdot \Delta W_E^{MMP} \right) \cdot InEnd_h \\ & + \left(C_{прод,h}^{MMP} \cdot \frac{P_{nom} \cdot 1}{60} W_E - C_{куп,h}^{MMP} \cdot \frac{\Delta W_G^{MMP}}{60} \right) \cdot t_{G,h} \end{aligned} \right).$$

Приведене до доби значення постійної складової витрат оцінюється за формулою:

$$Cost_D^{Const} = \left(1 + \frac{R}{100} \right) \cdot \left(\frac{1}{365} \cdot \left(\frac{1}{N_{OK}} \cdot Inv^{MMP} + Cost_{Serv}^{MMP} \right) + C_{ГОТ}^{MMP} \right),$$

де R – планова норма рентабельності енергогенеруючої компанії, (%); 100 – коефіцієнт перерахунку процентів у відносні одиниці; 365 – кількість днів у році; N_{OK} – планова кількість років окупності енергоблоку із MMP; Inv^{MMP} – сума інвестицій в енергоблок міні-АЕС із MMP, (€); $Cost_{Serv}^{MMP}$ – річні витрати на обслуговування енергоблоку міні-АЕС із MMP, (€); $C_{ГОТ}^{MMP}$ – добові витрати на підтримку стану готовності MMP до запуску в роботу під завантаження з номінальною потужністю, (€).

Оцінка ефекту від експлуатації малого модульного ядерного реактора на міні-АЕС. Наведена в публікації математична модель імітує побудову оптимального добового графіка завантаження MMP на міні-АЕС. Для розв’язання задачі оцінки ефекту від експлуатації енергоблоку із MMP на міні-АЕС необхідно додатково враховувати сезонні коливання попиту на електричну енергію та відповідні коливання ринкових цін. Для цього достатньо обрати типові для окремих сезонів року (наприклад, зима, літо і весна/осінь) результати торгів РДН, ретроспективні значення яких публікуються на офіційному сайті Оператора ринку. За потреби додатково додається ретроспектива типових ринкових цін для врахування особливостей ціноутворення на РДН у вихідні та будні дні чи інших особливостей ціноутворення в різні сезони року. Результати розрахунків, отримані для кожного типового графіка погодинних ринкових цін, апроксимуються з метою визначення вигоди від експлуатації MMP на міні-АЕС за рік.

Розглянемо приклад побудови оптимального добового графіка завантаження MMP на міні-АЕС із використанням статистичної інформації про ринкові ціни за 19 лютого 2024 року. У розрахунках використано отримані на офіційному сайті НКРЕ КП чинні в цю добу тарифи на диспетчерське управління, передачу й розподіл (для ДТЕК Київські електромережі) електричної енергії. Інформацію про тарифи електропостачальника отримано на офіційному сайті Yasno для Києва. Інформацію про основні техніко-економічні характеристики MMP отримано на офіційному сайті NuScale Power та в інших відкритих джерелах інформації.

Сформований за результатами оптимізації добовий графік функціонування MMP на міні-АЕС відображений на рис. 4. З огляду на наявну інформацію про характеристики MMP NuScale та з урахуванням курсу на міжбанківській валютній біржі за 19 лютого 2024 року собівартість відпуску електроенергії оцінюється як 3 895 €/МВт·год. Тому для ринкових цін, що склалися на РДН для періоду реалізації угод 19 лютого 2024 року, рентабельність виробництва електричної енергії (враховуючи витрати на запуск і зупинку MMP) забезпечувалася лише з 18:00 до 21:00 включно. Режим запуску MMP за результатами оптимізації визначено

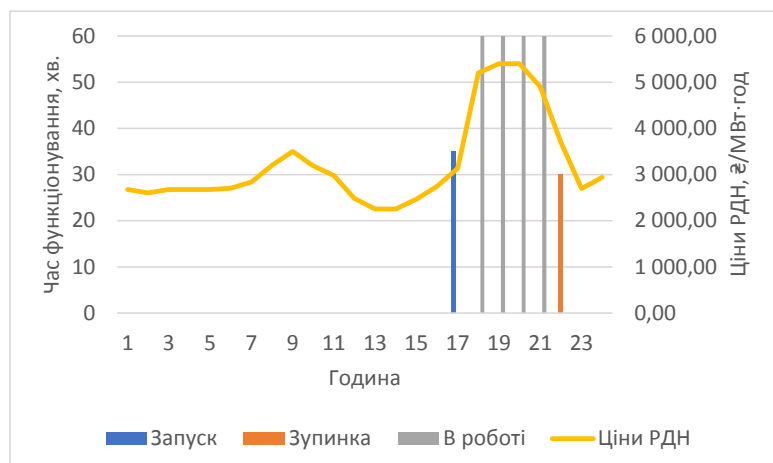


Рис. 4. Графік завантаження ММР NuScale з ринковими цінами на 19.02.2024

на кінець 20-ї години, а режим зупинки ММР – на початок 22-ї години. Експериментальні дослідження показали, що функціонування ММР додатково у 9-ту годину, коли ціна на РДН склала 3 299 €/МВт·год, економічно доцільне лише за собівартості відпуску електроенергії не більше 2 920 €/МВт·год.

Представлена у публікації математична модель визначає для окремих годин доби лише факт режимів запуску чи зупинки ММР, а також кількість хвилин роботи ММР із номінальним на-

вантаженням, чого достатньо при розв’язанні задачі оцінки економічного ефекту від експлуатації ММР на міні-АЕС. За потреби використання запропонованої математичної моделі в задачах планування режимів функціонування ММР на міні-АЕС не складно реалізувати додатково процедури розрахунку моментів початку режимів запуску й зупинки ММР за результатами оптимізації.

Висновки. Представлена в публікації математична модель дає змогу сформувати оптимальний за заданих ринкових цін добовий графік функціонування ММР на міні-АЕС при розв’язанні задачі оцінки економічного ефекту від експлуатації ММР. Реалізація розрахункових засобів на основі запропонованої математичної моделі надаватиме інструментарій для оцінки доцільності інвестування проєктів будівництва та експлуатації ММР на міні-АЕС. Крім того, запропонована математична модель придатна як основа для розробки засобів планування графіків завантаження ММР на міні-АЕС.

Роботу виконано в межах реалізації НДР за темою П-25-23 «Удосконалення та розробка основного обладнання турбоагрегатів енергоблоків АЕС, у тому числі з використанням технологій малих модульних реакторів та акумулювання енергії, з метою забезпечення енергетичної безпеки та стійкого розвитку економіки України у воєнний та повоєнний періоди», яка виконується в рамках бюджетної програми «Підтримка розвитку пріоритетних напрямів наукових досліджень» (КПКВК 6541230) на 2023–2024 роки за пріоритетним напрямом «Технології тепло-, електро- та атомної енергетики для забезпечення енергетичної безпеки України»

1. Кириленко О.В., Блінов І.В., Парус Є.В., Трач І.В. Оцінка ефективності використання систем накопичення електроенергії в електричних мережах. *Технічна електродинаміка*. 2021. № 4. С. 44–54. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2021.04.044>
2. Мокін, Б.І., Мокін О.Б., Шалагай Д.О. Перші два етапи системного аналізу плану відбудови енергетики України в напрямку інтеграції в неї відновлювальних джерел. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2023. № 2: 42–48. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2023-167-2-42-48>
3. Кириленко О. В. Заходи та засоби перетворення енергетики України на інтелектуальну екологічно безпечну систему. Доповідь на науковій сесії Загальних зборів НАН України 17 лютого 2022 року. *Вісник Національної Академії наук України*. 2022. № 3. С. 18–23. DOI: <https://doi.org/10.15407/visn2022.03.018>
4. Коньшин В.І.; Квятковський Б.Б. Майбутнє атомної енергетики України з позиції розвитку низьковуглецевої економіки. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2023. № 2. С. 72. DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.2.2023.279706>
5. Петрусь О., Кравченко, В., Погосов О., Земеров Е. Малі модульні реактори, перспективи та виклики для енергосистеми України. *Scientific Collection «InterConf»*. 2023. (184). С. 398–416. Retrieved from <https://archive.interconf.center/index.php/conference-proceeding/article/view/5113>
6. Nick Van Hee, Herbert Peremans, Philippe Nimmegeers. Economic potential and barriers of small modular reactors in Europe. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2024. Volume 203. 114743. ISSN 1364-0321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114743>
7. Парус Є.В., Блінов І.В., Костіков А.О. Оцінка вартості послуг добового регулювання електроспоживання неманевреними накопичувачами електричної енергії. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. 2023. Вип. 65. С. 21. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2023.65.021>

8. Welter Kent, José N. Reyes Jr, and Adam Brigantic. Unique safety features and licensing requirements of the NuScale small modular reactor. *Frontiers in Energy Research*. 2023. No 11. P. 1160150.
9. Правила ринку «на добу наперед» та внутрішньодобового ринку. Постанова НКРЕКП № 308 від 14.03.2018. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0308874-18#Text> (дата звернення 04.10.2024).
10. Правила ринку. Постанова НКРЕКП № 307 від 14.03.2018.6. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0307874-18#Text> (дата звернення 04.10.2024).
11. Про ринок електричної енергії: Закон України від 13.04.2017 №2019-VIII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2019-19#Text> (дата звернення 04.10.2024).
12. Блінов І.В., Парус Є.В., Мірошник В.О., Шиманюк П.В., Сичова В.В. Модель оцінки доцільності переходу промислових споживачів до погодинного обліку електричної енергії на роздрібному ринку. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2021. № 1. С. 88–97. DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.1.2021.242186>
13. Блінов І.В., Парус Є.В., Клименко О.Г., Ключко О.І. Спосіб порівняльних оцінок комерційних пропозицій електропостачальників для споживачів без погодинного обліку електричної енергії. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2023. № 3. С. 36–42. DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.3.2023.289654>
14. Блінов І.В., Парус Є.В., Рибіна О.Б. Способи визначення плати електростанціям за готовність та фактичне надання послуг з первинного та вторинного регулювання частоти в Україні. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. 2012. № 33. С. 128–134.
15. Bodie Zvi; Kane Alex; Marcus Alan. *Essentials of Investments*. McGraw Hill. 2005. P. 452. ISBN 9780072510775.

ASSESSMENT OF THE EFFICIENCY OF SMALL MODULAR NUCLEAR REACTOR ON THE ELECTRICITY MARKET

E.V. Parus¹, I.V. Blinov¹, A.O. Kostikov²

1 – Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Beresteyskiy ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine

2 – Pidhornyi's Institute of Energy Machines and Systems of NAS of Ukraine, Pozhars'koho St., 2/10, Kharkiv, 61046, Ukraine

e-mail: paruseugene@gmail.com, blinovigor81@gmail.com, kostikov@ipmach.kharkov.ua

A mathematical model for constructing an optimal loading schedule of a power unit with a small modular nuclear reactor is presented. The main conditions of operation of small modular nuclear reactors with constructive solutions similar to the development of NuScale are determined, and the architecture of the mathematical model for the search of optimal schedules of their operation is presented. The main attributes of the operating modes of small modular nuclear reactors and a mathematical model for simulating the control functions of the reactor operation schedules have been determined. The main components for displaying the results of purchase-lease/sale of electricity by the power-generating company have been determined. The objective function of maximizing the benefit from the operation of a small modular nuclear reactor and limiting the profitability of its operation is given. The basics of the methodology of using the model for building the optimal daily schedule of the functioning of a small modular nuclear reactor in the tasks of assessing the effect of the construction and operation of such reactors at a nuclear power plant have been formulated. Ref. 15, fig. 4, table.

Keywords: small modular nuclear reactor, optimization, economic effect assessment, day-ahead market.

1. Kyrylenko O., Blinov I., Parus E., Trach I. Evaluation of efficiency of use of energy storage system in electric networks. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2021. No 4. Pp. 44–54. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2021.04.044> (Ukr)
2. Mokin B.I., Mokin O. B., Shalagai D. O. The First Two Stages of the Systemic Analysis of the Plan for the Reconstruction of Ukraine's Energy Sector Towards Integration of Renewable Sources. *Visnyk VPI*. 2023. No. 2. Pp. 42–48. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2023-167-2-42-48> (Ukr)
3. Kyrylenko O. (2022). Measures and ways of transforming Ukraine's energy sector into an intelligent environmentally friendly system. Report at the scientific session of the General Meeting of the NAS of Ukraine. *Visnyk Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2022. No 3. Pp. 18–23. DOI: <https://doi.org/10.15407/visn2022.03.018> (Ukr)
4. Valerij Konshin, Bohdan Kviatkovskiy. The future of atomic energy in ukraine from the position of the development of a low-carbon economy. *Power engineering: economics, technique, ecology*. 2023. No 2 Pp. 72. DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.2.2023.279706> (Ukr)
5. Petrys O., et al. Small modular reactors, prospects and challenges for the energy system of Ukraine. *Scientific Collection «InterConf»*. 2023. No 184. Pp. 398–416. URL: <https://archive.interconf.center/index.php/conference-proceeding/article/view/5113> (Ukr)

6. Nick Van Hee, Herbert Peremans, Philippe Nimmegeers. Economic potential and barriers of small modular reactors in Europe. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2024. Vol. 203. Pp. 114743. ISSN 1364–0321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114743>
7. Parus Ye.I., Blinov I.V., Kostikov A.O. Estimation of the cost of services for daily regulation of electricity consumption by non-manoeuvrable electricity storage facilities. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky NAN Ukrainy*. 2023. No. 65. Pp. 21. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2023.65.021> (Ukr)
8. Welter Kent, José N. Reyes Jr, and Adam Brigantic. Unique safety features and licensing requirements of the NuScale small modular reactor. *Frontiers in Energy Research*. 2023. No 11 P. 1160150.
9. Rules day-ahead market and intraday market: Decree NKREKP No 308 14.03.2018. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0308874-18#Text> (revision 04.10.2024). (Ukr)
10. Rules of the market. Decree NKREKP No 307 14.03.2018.6. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0307874-18#Text> (revision 04.10.2024). (Ukr)
11. On Electricity Market: The Law of Ukraine 13.04.2017 No 2019-VIII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2019-19#Text> (revision 04.10.2024). (Ukr)
12. Blinov I.V., Parus E.V., Miroshnyk, V.O., Shymaniuk P.V., Sychova V.V. Model of evaluation the feasibility of industrial customers to hourly accounting of retail electricity market. *Power engineering: economics, technique, ecology*. 2021. No. 1. Pp. 88–97. DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.1.2021.242186>
13. Blinov I., Parus E., Klymenko O., Kliuzko O. The method of comparative evaluations of commercial offers of electricity suppliers for consumers without hourly electricity metering. *Power engineering: economics, technique, ecology*. 2023. No. 3 Pp. 36–42. DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.3.2023.289654>
14. Blinov I.V., Parus Ye.V., Rybina O.B. Methods of payment for power station for readiness and actual provision of services of primary and secondary frequency control in Ukraine. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky NAN Ukrainy*. 2012. No 33. Pp. 128–134.
15. Bodie Zvi; Kane Alex; Marcus Alan. *Essentials of Investments*. McGraw Hill. 2005. P. 452. ISBN 9780072510775.

Надійшла: 17.10.2024

Прийнята: 21.11.2024

Submitted: 17.10.2024

Accepted: 21.11.2024

ПИТАННЯ РОЗРОБЛЕННЯ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМОЇ АВТОМАТИКИ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ АВАРІЙНИХ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ

О.Ф. Буткевич^{*1,2}, докт. техн. наук, **Т.М. Гурєєва¹**, **Н.Т. Юнєєва¹**, канд. техн. наук

1 – Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна

2 – Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”,
пр. Берестейський, 37, Київ, 03056, Україна

e-mail: o.butkevych@gmail.com, untunt1970@gmail.com

Розглянуто особливості підходу, використаного для розроблення цифрових моделей пристроїв системної автоматизації електроенергетичних систем (ЕЕС). Показано роль графічного інтерфейсу як інструментального засобу підготовки таких моделей та маніпулювання ними для ефективного формування та використання зазначених моделей під час моделювання аварійних режимів ЕЕС. На прикладах автоматизації частотного розвантаження (АЧР) та автоматизації ліквідації асинхронних режимів (АЛАР) проаналізовано особливості функціонування та налаштування моделей. Наведено результати використання розроблених моделей АЛАР під час моделювання аварійних режимів об'єднаної енергосистеми України з виявленням електричного центру хитань на лініях електропередавання напругою 750 і 330 кВ у Західній і Південно-Західній ЕЕС. Для перевірки адекватності моделей АЧР було використано дані щодо АЧР, отримані від регіональних енергосистем України. Моделювані аварійні збурення призводили до виникнення дефіциту активної потужності генерування та пониження частоти, внаслідок чого спрацьовували пристрої АЧР. Бібл. 3, рис. 8.

Ключові слова: електроенергетична система, аварійний режим, системна автоматизація, моделювання.

Запобігати розвитку аварій та втраті стійкості електроенергетичної системи має релейний захист та протиаварійна автоматизація (ПА). Результати моделювання аварійних електромеханічних перехідних процесів в ЕЕС залежать, насамперед, від адекватності моделей складових комплексної моделі ЕЕС, зокрема (і не в останню чергу) від моделей релейного захисту та протиаварійної автоматизації (ПА). Із метою узагальнення (без втрати функціональних особливостей під час формалізації опису моделей) релейний захист розглядаємо як складову системної автоматизації. Моделювання аварійних процесів в ЕЕС може мати різне призначення – дослідження проблеми стійкості ЕЕС, вибір уставок пристроїв ПА, вибір чи перевірка відповідності комутаційного обладнання та інше. Кожна автоматизація є елементом функціональної структури певної підсистеми ПА, а сукупність таких підсистем утворює функціональну структуру ПА певного енерговузла, енергорайону, ЕЕС чи об'єднаної ЕЕС (ОЕС). У сучасних мікропроцесорних пристроях поєднують функції захисту, автоматизації, контролю та управління. До таких мікропроцесорних пристроїв належать, наприклад, 7UT513 (виробництва фірми «Siemens») і МРЗС-05-01 (виробництва заводу «Київприлад»). Однак під час розроблення моделей пристроїв релейного захисту та системної автоматизації (використовуватимемо узагальнювальне позначення РЗА) достатньо забезпечити лише *функціональну* відповідність моделі оригіналу (конструктивні особливості та характеристики реальних пристроїв РЗА впливатимуть лише на значення відповідних параметрів, відтворених у моделях), що дає змогу використати уніфікований підхід до побудови моделей, передбачаючи врахування такої послідовності дій пристроїв РЗА під час їхнього функціонування (хоча не всі автоматизації мають обов'язково виконувати всі дії): 1) фіксація аварійної події чи виявлення виходу значень параметрів режиму ЕЕС за допустимі межі; 2) запам'ятовування стану та значень параметрів до аварійного режиму ЕЕС; 3) оцінювання інтенсивності аварійного збурення; 4) визначення необхідних керуючих дій за результатами оцінювання інтенсивності аварійного збурення (в окремих пристроях дії можуть бути апіорі визначеними); 5) формування та «видача» керуючих впливів (у вигляді вихідних сигналів керування).



Метою роботи є створення цифрових моделей та алгоритмів функціонування засобів системної автоматики та перевірка адекватності їхньої поведінки під час моделювання аварійних режимів ЕЕС.

Структурні особливості моделей пристроїв РЗА та засоби графічного інтерфейсу.

Потреба уніфікації опису моделей з одночасним забезпеченням певної гнучкості їхнього використання зумовлена наявністю великої номенклатури пристроїв РЗА, які використовують в ЕЕС, та значної кількості варіантів організації системи ПА. Під час розроблення моделей автоматики використано принцип формування *елементарних* (атомарних) умов, згідно з яким маємо насамперед дати відповіді на запитання «де?», «що?», «скільки?», тобто вказати об'єкт, величину чи дію, що контролюється, уставку чи величину впливу [1]. Об'єктами є вузли, лінії електропередачі (ЛЕП), перетини ЕЕС. За умовами перевіряються, наприклад, значення певних режимних параметрів, сальдо потужності в перетині та інше, контролюється стан (увімкнений чи вимкнений) певних елементів ЕЕС, час затримки (витримки часу) на виконання (чи невиконання, якщо не задовольняються відповідні умови) наступної дії. Крім того, використання моделей різних пристроїв РЗА під час моделювання аварійних режимів ЕЕС обов'язково мають забезпечувати потреби введення в роботу чи виведення з роботи окремих пристроїв чи підсистем РЗА, моделювання їхнього функціонування за заданою часовою програмою та моделювання відмов окремих пристроїв. *Елементарна умова* формується завданням об'єкта, де вимірюється контрольована величина, ідентифікатора контрольованої величини та уставки. Аналогічно визначається елементарний вплив: об'єкт, ідентифікатор впливу, величина впливу. Логічною конкатенацією *елементарних* умов можна сформувати складніші логічні конструкції, що відтворюють умови функціонування пристроїв чи систем автоматики. У загальному випадку вихідний сигнал (вектор сигналів) S_{out} пристрою (системи) ПА є результатом відповідного опрацювання (Φ) послідовностей сформованих умов (F), до яких входять дискретні сигнали (d), вимірювані та обчислювані параметри режиму (p_p) та системи (p_c), витримки часу (t):

$$S_{out} = \Phi [F_1(p_c, p_p, d, t), F_2(p_c, p_p, d, t), \dots, F_t(p_c, p_p, d, t), \dots] .$$

Розроблені моделі РЗА організовано у вигляді відповідної бібліотеки. Блок-схему моделювання аварійних перехідних процесів в ЕЕС з урахуванням функціонування пристроїв релейного захисту та протиаварійної автоматики (РЗА) наведено на рис. 1.



Рис. 1. Блок-схема моделювання аварійних перехідних процесів в ЕЕС з урахуванням функціонування пристроїв РЗА

Бібліотеку моделей пристроїв РЗА організовано у вигляді файлової структури, що забезпечує гнучкість і незалежність використання моделей та дає змогу зберігати різні варіанти моделювання (за різними сценаріями) аварійних режимів ЕЕС. Відсутні обмеження щодо кількості та типів моделей, що зберігаються в бібліотеці. Для використання моделей пристроїв системної автоматики під час моделювання аварійних електромеханічних перехідних процесів у конкретних ЕЕС слід попередньо «встановити» такі пристрої в ЕЕС (копії моделей із бібліотеки моделей РЗА отримують «адресне прив'язування» до об'єктів, каналів отримання інформації). Для формування моделей РЗА та їхнього «встановлення» на об'єктах ЕЕС, для маніпулювання моделями (тут мається на увазі «виведення з роботи»/«введення в роботу», зміна значень параметрів, зміна/коригування умов та інше) розроблено засоби графічного інтерфейсу. Операційне вікно зазначеного графічного інтерфейсу показано на рис. 2, його можна умовно поділити на три зони: «Дія автоматики», «Перетини» та «Об'єднана дія». Перша із зазначених зон призначена для формування завдання на моделювання пристроїв

РЗА в разі врахування дії таких пристроїв під час моделювання аварійних електромеханічних перехідних процесів в ЕЕС. У правій частині цієї зони розташовано клавіші та віконця, які дають змогу формувати моделі пристроїв автоматики. Активні віконця («Вузли», «Лінії електропередавання») призначені для вибору об'єктів, де вимірюються контрольовані параметри чи реалізуються керуючі впливи.

Цей інтерфейс дає змогу конструювати всі послідовності дій різних пристроїв РЗА, які відтворюються в моделях. Засоби зазначеного графічного інтерфейсу надають можливість зберігати в бібліотеці моделі пристроїв РЗА під унікальним ім'ям (із коротким коментарем за потреби) та зчитувати моделі з бібліотеки для встановлення на об'єктах.

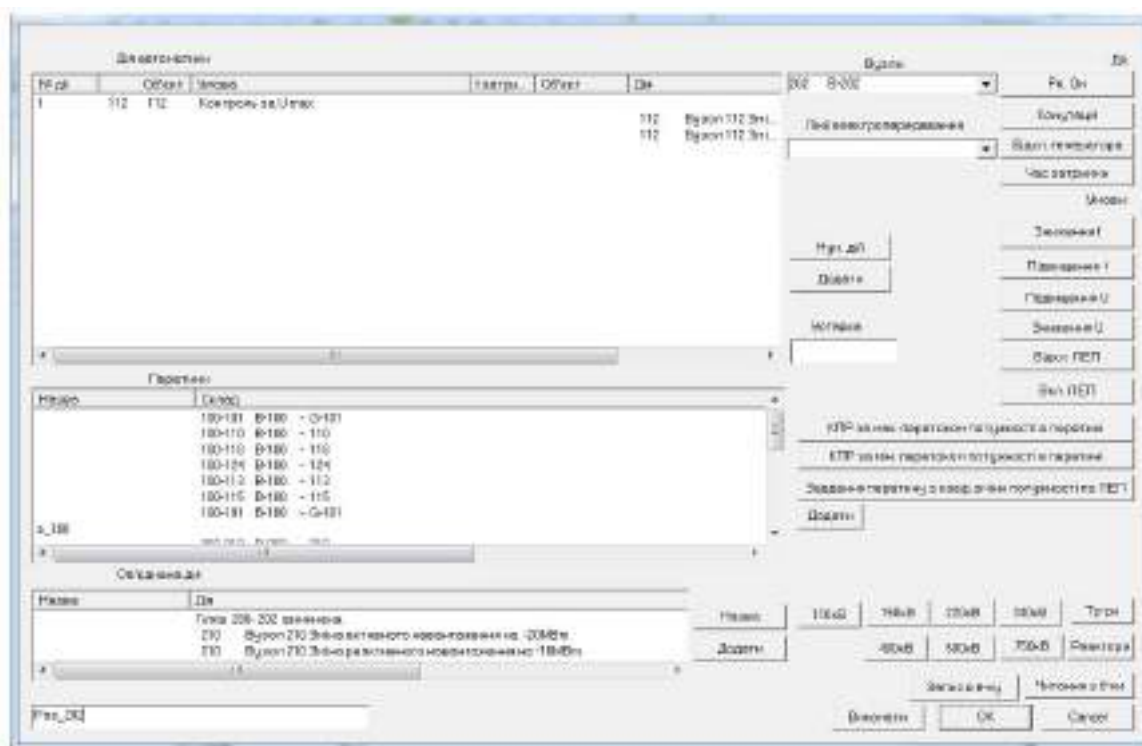


Рис. 2. Операційне вікно графічного інтерфейсу для роботи з моделями пристроїв РЗА

Усі цифрові моделі пристроїв РЗА реалізовано у вигляді незалежних програмних модулів.

Деякі особливості функціонування та налаштування моделей автоматики частотного розвантаження. Для категорій АЧР-I та АЧР-II ідентифікатором контрольованої величини є частота в ЕЕС, а щодо уставки для АЧР передбачено використання пари значень – частоти та витримки часу на спрацьовування (після витримки часу на спрацьовування в моделі АЧР має вступати в дію наступний елемент модельованої структури ПА – елементарний вплив). Під час налаштування моделей АЧР слід передбачити, щоб потужність споживачів електроенергії, що приєднується до АЧР-I, рівномірно розподілялася між чергами АЧР у діапазоні 48,8...46,5 Гц з інтервалом у 0,1 Гц. Обсяги потужності, заведені під АЧР, залежать від потужності електроспоживання конкретних ЕЕС. Щоб уникнути надлишкового вимкнення споживачів за різних аварій із дефіцитом генеруючої потужності слід використовувати велику кількість черг АЧР (чим більшою є кількість черг, тим гнучкішою є система АЧР), мінімізуючи обсяги вимкнення потужності споживачів (розроблені програмні засоби та бібліотека моделей РЗА дають змогу практично не обмежувати кількість черг АЧР, яка залежатиме від значень параметрів моделей пристроїв АЧР). Під час налаштування моделей як початкові значення витримок часу на спрацьовування для всіх черг АЧР-I автоматично встановлюється (як усталено) 0,1 с, передбачаючи, що в фізичних пристроях АЧР використовуються напівпровідникові реле частоти. За потреби для окремих моделей пристроїв значення параметрів може бути змінено з використанням засобів графічного інтерфейсу.

Під час налаштування параметрів моделей пристроїв АЧР-II як верхній рівень уставок передбачено використання (як усталено) 49,0 Гц, що на 0,2 Гц вище від верхнього рівня

установок частоти АЧР-I. Витримки часу (установки за часом) пристроїв АЧР-II відрізняються одна від одної на 3 с і зростають (до 60 с, а за потреби можуть бути збільшені до 90 с), починаючи від черг АЧР-II із максимальними уставками частоти до черг АЧР-II із мінімальними уставками. Якщо дефіцит потужності досягатиме максимального розрахункового, то кінцевий час дії АЧР-II визначатиметься її кінцевими уставками. Для забезпечення гнучкішої дії АЧР передбачено також сумісну дію АЧР-I та АЧР-II на відключення одних і тих же споживачів, що здебільшого дає змогу відновити частоту до рівня уставки АЧР-II 48,8 Гц (обсяг несуміщених черг АЧР-II має бути не меншим 10 % від встановленої потужності ЕЕС).

Відмінністю моделей пристроїв АЧР-III і АЧР-I є наявність додаткового контролю швидкості зниження частоти, оскільки пристрої АЧР-III функціонують у разі виникнення значного дефіциту активної потужності. Такий контроль здійснюється додатково до контролю уставки за частотою, подібно до моделей АЧР-I. Якщо швидкість зниження частоти перевищує 1,7 Гц/с, то починають діяти черги АЧР-III, але обсяги потужності споживачів, «заведених під» черги АЧР-III, мають бути значно більшими від обсягів, «заведених під» черги АЧР-I. Якщо швидкість зниження частоти вже не перевищує 1,7 Гц/с, то замість АЧР-III продовжує діяти АЧР-I. Контроль швидкості зниження частоти ($\frac{\Delta f}{\Delta t} > 1,7 \frac{\text{Гц}}{\text{с}}$) відповідно до

[2] здійснюється в розроблених програмних засобах блоком автоматики, який слідує і за швидкістю зниження частоти, маючи дані щодо об'єктів із встановленими пристроями АЧР-III.

В утилітарному аспекті доцільно підкреслити, що початкові налаштування параметрів цифрових моделей АЧР усіх трьох категорій АЧР виконуються відповідно до кодування структури протиаварійної автоматики з урахуванням формування елементарних умов. Початкове налаштування стосується тих параметрів моделей, які не залежать від схем різних ЕЕС і зумовлені лише фізикою протікання аварійних процесів унаслідок виникнення дефіциту генеруючих потужностей та відповідного зменшення частоти. Оскільки *ідентифікатор об'єкта*, де вимірюється контрольована величина, як і *ідентифікатор впливу*, залежать від конкретної ЕЕС, тобто від конкретних об'єктів та відповідних шин, де вимірюється частота й вимикаються фідери, від яких живляться споживачі електроенергії певної потужності навантаження (реалізуються *впливи* АЧР-I та АЧР-II зменшенням потужності електроспоживання), то значення відповідних параметрів вводяться до моделей АЧР-I та АЧР-II із використанням розроблених інструментальних засобів графічного інтерфейсу вже під час «розміщення» таких пристроїв АЧР на об'єктах конкретної ЕЕС.

Перевірка адекватності функціонування моделей АЧР. Перевірку адекватності функціонування моделей АЧР у складі програмного комплексу моделювання електромеханічних перехідних процесів в ЕЕС виконано з використанням моделі ЕЕС, що містила частково згорнуту (еквівалентну) схему системотвірної мережі ОЕС України, де було враховано 794 пункти (вузли), 1292 ЛЕП (гілок) та 68 синхронних генераторів. Для модельованого режиму було використано дані щодо АЧР, отримані від регіональних енергосистем України. Модельовані аварійні збурення призводили до виникнення дефіциту активної потужності генерування та пониження частоти, унаслідок чого спрацьовували пристрої АЧР. Тривалість моделювання відповідного аварійного електромеханічного перехідного процесу в ЕЕС становила 30 с, використовувався середньоінтервальний метод чисельного інтегрування диференціальних рівнянь, крок чисельного інтегрування брався незмінним і становив 0,02 с. Приклади відображення інформації щодо перебігу модельованого аварійного процесу ілюструють рис. 3 та 4, де відповідно показано фрагмент протоколу реєстрації подій та графіки зміни потужності навантаження й частоти на шинах електричної підстанції (ПС) 110 кВ «Каховська ГПП» Південної ЕЕС.

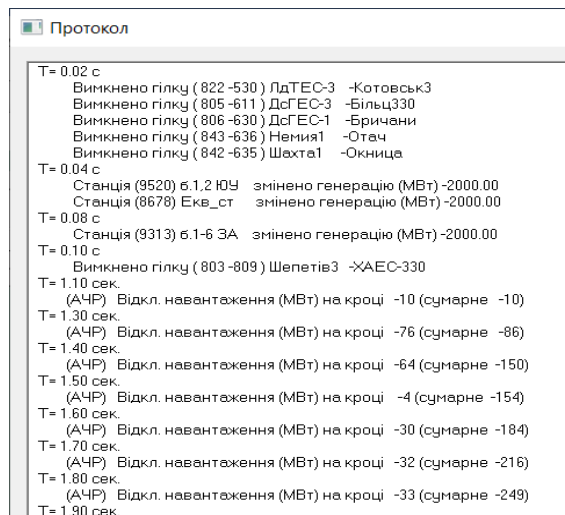


Рис. 3. Фрагмент протоколу реєстрації подій під час моделювання аварійного режиму ЕЕС з урахуванням АЧР

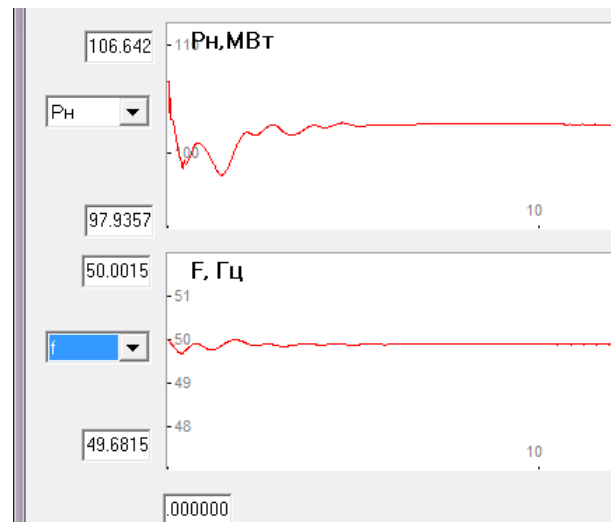


Рис. 4. Графіки зміни потужності навантаження і частоти на шинах ПС 110 кВ «Каховська ГПП» Південної ЕЕС

Деякі особливості функціонування моделей автоматики ліквідації асинхронного режиму. Під час розроблення моделей пристроїв АЛАР урахувано, що типовий пристрій АЛАР має до трьох ступенів спрацьовування, які ініціюються різними пусковими пристроями в різних поєднаннях. Наприклад, у мікропроцесорному пристрої АЛАР, реалізованому на базі модуля РЗА "Діамант" виробництва НВП Хартрон-Інкор (м. Харків) [3], виконано три ступені спрацьовування. Виявлення асинхронного режиму (АР) відбувається на підставі того, що кінець вектора вимірюваного комплексного опору (на комплексній площині значення опору можна подати координатами кінця відповідного вектора) потрапляє в зони спрацьовування, які мають прямокутну форму. Використано три зони, дві з яких (аналоги чутливого та грубого реле опору) для запобігання спрацьовуванню пристрою в разі короткого замикання без виникнення АР, а третя (для перевірки місця знаходження електричного центру хитань ЕЦХ) – для забезпечення селективності дії. Пристрій підраховує цикли АР. Перший та другий ступені можуть видавати сигнали для реалізації керівних впливів (дій) із метою збереження стійкості ЕЕС та швидкої ресинхронізації її частин (вимикання або розвантаження генераторів у надлишковій за генеруючою потужністю частині ЕЕС, вимикання навантаження у її дефіцитній частині), третій ступінь діє на вимикання ЛЕП.

У розроблених цифрових моделях АЛАР передбачено такі поєднання пускових пристроїв: із використанням лічильника циклів (фізично реалізованого на базі реле напрямку потужності) та контролем селективності (фізично контроль здійснюється з використанням реле опору); із лічильником циклів (фізично реалізованим на базі реле напрямку потужності) та з контролем модуля струму ЛЕП (фізично реалізовано на базі реле максимального струму).

Під час моделювання електромеханічних перехідних процесів в ЕЕС на об'єктах, де встановлено пристрої АЛАР, у точках часової дискретизації процесу моделювання визначаються ті параметри, за якими діють пускові пристрої АЛАР. Функціонування (спрацьовування) цифрових моделей пристроїв АЛАР відбувається відповідно до заданих у цих моделях умов та значень відповідних атрибутів моделей (параметрів), які можна змінювати (за потреби), використовуючи розроблені засоби графічного інтерфейсу.

Перевірка адекватності функціонування моделей АЛАР. Перевірку адекватності функціонування моделей АЛАР у складі програмного комплексу моделювання електромеханічних перехідних процесів в ЕЕС виконано з використанням тієї ж моделі ЕЕС, що і для перевірки моделей АЧР. Навантаження відповідали режиму зимового максимуму. Спочатку було виконано додаткове завантаження частини ЛЕП ОЕС України відключенням ЛЕП, що з'єднує розподільчі пристрої 750 кВ Хмельницької та Чорнобильської АЕС, із одночасним завантаженням блоку Рівненської АЕС та розвантаженням Київської ГЕС. Аварійним збу-

ренням, унаслідок якого втрачалася стійкість системи, було вимкнення ЛЕП, що поєднує розподільчі пристрої 330 кВ ПС Шепетівка 330 кВ та Хмельницької АЕС. Під час моделювання аварійного режиму було виявлено ЕЦХ на ЛЕП напругою 750 і 330 кВ в Західній і Південно-Західній ЕЕС, що відображено в протоколі реєстрації подій (рис. 5) та на графіках зміни потоків потужностей ЛЕП та різниці кутів (Δ кутів) між векторами напруги на шинах ПС Вінниця 750 кВ та ПС Західноукраїнська 750 кВ (рис. 6).

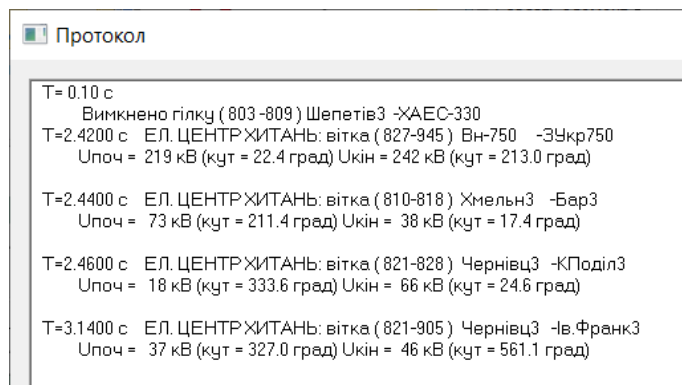


Рис. 5. Фрагмент протоколу реєстрації подій під час моделювання аварійного режиму ЕЕС з урахуванням АЛАР

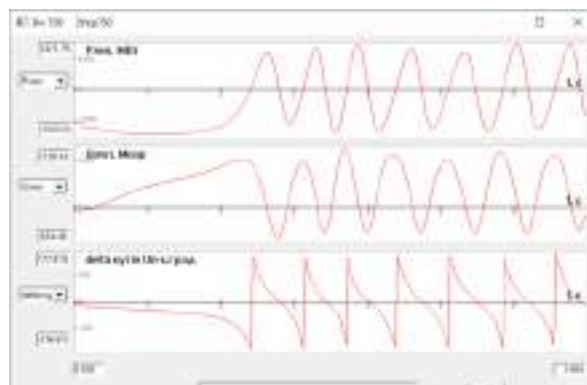


Рис. 6. Графіки зміни потоків активної та реактивної потужності ЛЕП та різниці кутів між векторами напруги на з'єднаних нею шинах ПС Вінниця 750 кВ та ПС Західноукраїнська 750 кВ

На рис. 7 наведено годограф вхідного опору, побудованого за вимірами пристрою АЛАР (встановленого на шинах приєднання ЛЕП, що з'єднує ПС Вінниця 750 кВ та ПС Західноукраїнська 750 кВ), та відповідний протокол (рис. 8), отримані внаслідок моделювання аварійного режиму ЕЕС із урахуванням АЛАР зазначеного вище мікропроцесорного пристрою «Діамант».

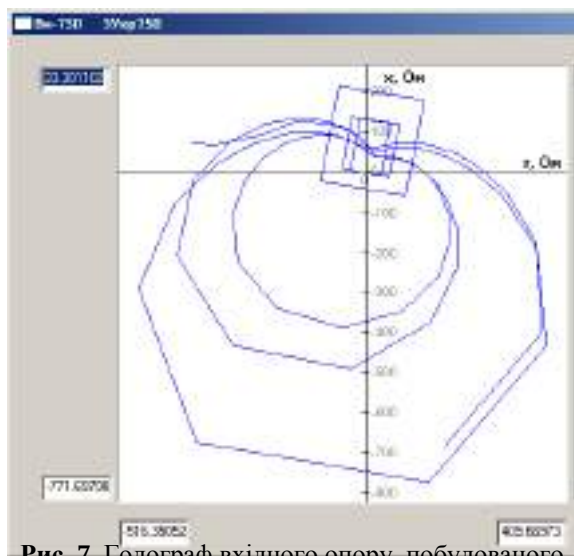


Рис. 7. Годограф вхідного опору, побудованого за вимірами пристрою АЛАР

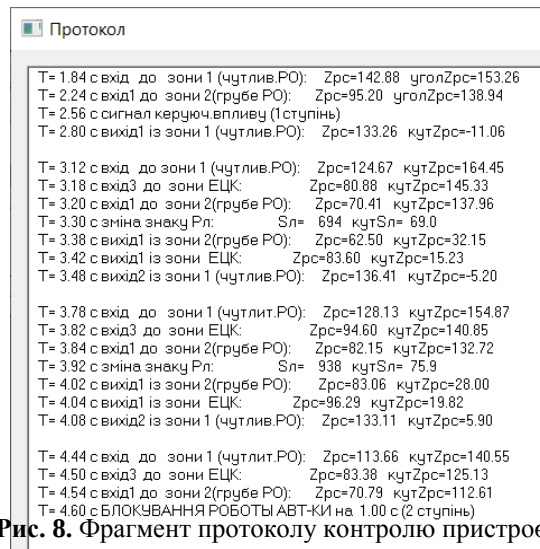


Рис. 8. Фрагмент протоколу контролю пристроєм АЛАР значень вхідного опору під час моделювання аварійного режиму ЕЕС

Висновки. Із використанням уніфікованого підходу до формування (конструювання) моделей пристроїв системної автоматики ЕЕС розроблено цифрові моделі таких пристроїв та перевірено адекватність їхнього функціонування. Розроблені засоби графічного інтерфейсу

забезпечують високу ергономічність та ефективність формування та використання зазначених моделей під час моделювання аварійних режимів ЕЕС.

Роботу виконано за держбюджетною темою «Забезпечення стійкості та надійності національної електроенергетики в умовах синхронної роботи ОЕС України з континентальною європейською енергетичною системою ENTSO-E» (шифр «РЕЖИМ-2», КПКВК-6541230).

1. Буткевич О.Ф., Гурєєва Т.М., Юнеєва Н.Т. Особливості розроблення та використання моделей протиаварійної автоматики енергосистем. *Electrical and Power Engineering and Electromechanics (EPEE)* 2024). Odesa, Ukraine, May 15, 2024. Odesa Military Academy. С. 17–18. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.25858477>
2. Правила застосування системної протиаварійної автоматики запобігання та ліквідації небезпечного зниження або підвищення частоти в енергосистемах. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1896-12#n354>
3. ПМ РЗА "ДІАМАНТ" – Комплекс технических средств автоматизации, защиты и АСУТП энергетических объектов. URL: <https://leg.co.ua/stati/rzaia/pm-rza-diamant-kompleks-tehnicheskikh-sredstv-avtomatizacii-zaschity-i-asutp-energeticheskikh-obektov.html>

THE ISSUES OF THE SYSTEM AUTOMATION MODELS DEVELOPMENT FOR POWER SYSTEMS FAULT CONDITION STUDY

O.F. Butkevych^{1,2}, T.M. Hurieieva¹, N.T. Yunieieva¹

1 – Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Beresteiskyi ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine

2 – National Technical University of Ukraine Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Beresteiskyi ave. 37, Kyiv, 03056, Ukraine
e-mail: o.butkevych@gmail.com, untunt1970@gmail.com

The peculiarities of the approach used to the development of digital models of system automation devices for power systems fault condition simulation are considered. Some issues related to the practical development of digital models of system automation devices of power systems are briefly outlined. The role of the graphical interface as a tool for preparing such models and manipulating them is shown. Using the examples of automatic frequency unloading and automatic elimination of asynchronous modes, the peculiarities of the functioning and setting up of the models are analyzed. The results of the use of the developed models during the Interconnected power system (IPS) of Ukraine fault condition simulation are presented. The results of the use of the developed automatic elimination of asynchronous modes during the simulation of emergency modes of the IPS of Ukraine with the detection of the electrical center of oscillations on the 750 kV and 330 kV power transmission lines in the Western and South-Western power system are presented. To check the adequacy of the automatic frequency unloading models, the data obtained from the regional power systems of Ukraine were used, the simulated emergency disturbances led to a shortage of active generating power and a decrease in frequency, as a result of which the automatic frequency unloading devices were activated. Ref. 3, fig. 8.

Key words: power system, power system fault condition, system automation, simulation.

1. Butkevych O.F., Hurieieva T.M., Yunieieva N.T. The peculiarities of the development and use of emergency automation models of power systems. *Electrical and Power Engineering and Electromechanics (EPEE)* 2024). Odesa, Ukraine, May 15, 2024. Odesa Military Academy. Pp. 17–18. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.25858477> (Ukr)
2. The rules for the use of system anti-emergency automation for the prevention and elimination of a dangerous frequency decrease or increase in power systems. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1896-12#n354> (Ukr)
3. PM RZA DIAMANT. A complex of technical means of automation, protection and automated control systems of power objects. URL: <https://leg.co.ua/stati/rzaia/pm-rza-diamant-kompleks-tehnicheskikh-sredstv-avtomatizacii-zaschity-i-asutp-energeticheskikh-obektov.html> (Rus)

Надійшла: 10.10.2024

Прийнята: 28.10.2024

Submitted: 10.10.2024

Accepted: 28.10.2024

ОПТИМІЗАЦІЯ ДОБОВОГО ГРАФІКУ РОБОТИ ГІДРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ З УРАХУВАННЯМ НЕЛІНІЙНОЇ ФУНКЦІЇ ВИТРАТ НА ВЛАСНІ ПОТРЕБИ

Д.О. Олефір*, Є.В. Парус**, канд. техн. наук, О.Б. Рибіна***, канд. техн. наук,

В.О. Мірошник****, канд. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна

e-mail: paruseugene@gmail.com

Представлено математичну модель добового розподілу наявних гідроресурсів гребельної ГЕС із урахуванням нелінійної функції технологічних витрат електричної енергії. Наведено функцію вигоди від продажу електричної енергії на ринку «на добу наперед». Представлено лінійну та нелінійну функції витрат на закупівлю електричної енергії для покриття власних потреб електроспоживання генераторів ГЕС за різних режимів їхнього завантаження. Представлено цільову функцію вигоди від продажу електроенергії на ринку «на добу наперед» із урахуванням вартості закупівлі електричної енергії на покриття технологічних потреб функціонування генераторів ГЕС у різних режимах завантаження. Наведено систему обмежень гідроресурсів у технологічному вузлі «Водосховище ГЕС». Виконано тестові розрахунки з використанням представлених математичних моделей та проаналізовано результати таких розрахунків. Бібл. 8, рис. 3.

Ключові слова: гідроелектростанція, оптимізація, ринок електричної енергії, ринок «на добу наперед».

Вступ. Гідроелектростанції (ГЕС) відіграють важливу роль у структурі виробничих потужностей ОЕС України, функціонування яких відбувається в ринкових умовах [1–3] та умовах синхронної роботи з ENTSO-E [4]. Окрім виробництва електроенергії, гребельні ГЕС наразі також є основним постачальником для Оператора системи передачі послуг відновлення частоти в ОЕС України [5, 6]. Активне регулювання режимів ОЕС України гребельними ГЕС призводить до суттєвих відхилень їхніх фактичних графіків роботи від планових та відповідно до відхилення витрат гідроресурсів від планових значень, а також до появи порушень технологічних обмежень водного балансу водосховищ [7].

У [7] наведено математичну модель, в якій вигода від продажу електроенергії визначається різницею між фактичною ціною продажу та деякою усередненою ціною витрат на виробництво електричної енергії. Така постановка задачі дала змогу достатньо просто розраховувати ціну проданої електроенергії і, у ряді випадків, взагалі не зважати на витрати, пов'язані з виробництвом електроенергії. Для більш детального урахування таких витрат необхідно дослідити особливості врахування функції витрат, пов'язаних із виробництвом електроенергії на ГЕС, та вплив цієї складової на результати оптимізації.

Мета статті полягає в побудові моделі оптимального розподілу наявних гідроресурсів для виробництва електричної енергії з урахуванням лінійних та нелінійних характеристик споживання власних потреб на ГЕС.

Архітектура математичної моделі розподілу гідроресурсів.

Із метою розв'язання задачі оптимального розподілу доступних на добу гідроресурсів для гідротехнічного вузла «Водосховище – ГЕС» сформовано математичну модель, в основі якої – функції формалізованого відображення технологічних процесів у гідротехнічному вузлі (рисунок 1), а також системи технічних, режимних і екологічних обмежень.

У математичній моделі відображено опис технологічних процесів у гідротехнічному вузлі, структурований із виділенням таких основних складових:

- опис технологічних процесів для гідроагрегатів (ГА);
- опис технологічних процесів для ГЕС;
- опис технологічних процесів для водосховища.



Опис технологічних процесів для ГА формується на основі залежностей витрат гідроресурсів на виробництво електричної енергії. Змінними оптимізації обрано обсяги відпуску електричної енергії. Якщо оптимізація виконується за ціновими критеріями, то пошук оптимальних рішень здійснюється із використанням функцій вартості продажу електричної енергії у ринкових сегментах та з урахуванням витрат на реалізацію функцій виробництва електроенергії, передусім вартості електроенергії на забезпечення власних потреб ГА.



Рис. 1. Архітектура моделі оптимального розподілу гідроресурсів для виробництва електроенергії на гребельній ГЕС

Система обмежень у формалізованому відображенні функцій ГА формується із таких складових:

- технологічні межі режимів роботи ГА, передусім технологічний мінімум та технологічний максимум завантаження ГА;
- режимні обмеження на рівні завантаження ГА, до яких зокрема відносяться обсяги резервів виробничих потужностей для надання допоміжних послуг.

На структурному рівні ГЕС формалізується опис функцій загально станційних витрат, які залежать від завантаження ГА. За потреби на цьому структурному рівні формуються рівняння сумарного відпуску електричної енергії від ГЕС та рівняння сумарних корисних витрат гідроресурсів. Крім того, для ГЕС формалізуються системи режимних обмежень щодо мінімального та максимального погодинних обсягів відпуску електроенергії, які Оператор системи передачі в окремих випадках накладає на електростанцію.

Водосховище в математичній моделі відображається характеристиками технологічного мінімуму й максимуму та корисного об'єму.

Нарешті, на рівні гідротехнічного вузла «Водосховище – ГЕС» формуються рівняння балансів гідроресурсів на розрахунковий період. Під розрахунковим періодом розуміється зазначений у [2] період часу (60 хвилин), щодо якого визначаються ціна та обсяги купівлі-продажу електричної енергії. Виділяються такі основні складові балансів:

- функція надходження гідроресурсів до водосховища протягом розрахункового періоду часу, яка у загальному випадку визначається залежностями від водостоку на ГЕС угору руслом ріки;
- функція водостоку, яка визначається як сумарний об'єм корисних витрат та холостого скиду води вниз руслом ріки;
- функції контролю рівня заповнення водосховища протягом розрахункового періоду;
- різниця в рівнях заповнення водосховища на початку та в кінці розрахункового періоду як основа для визначення доступного об'єму гідроресурсів;
- екологічні обмеження на об'єми водостоку протягом розрахункового періоду.

Під функцією контролю рівня заповнення водосховища протягом розрахункового періоду в публікації розуміється система обмежень (частина математичної моделі), призначена

для контролю за дотриманням технічних обмежень щодо рівня заповнення водосховища з урахуванням об'ємів надходження й витрат води по кожному розрахунковому періоду. Тобто йдеться про задачу планування діяльності ГЕС, при розв'язанні якої враховуються правила експлуатації водосховища. Контроль персоналом електростанції фактичного рівня заповнення водосховища є задачею моніторингу та в публікації не розглядається.

Попереднє означення цільової функції.

Структурно цільову функцію для розв'язання задачі оптимального розподілу гідроресурсів генераторами ГЕС сформовано як різницю між вигодою від продажу електричної енергії та витрат на закупівлю електричної енергії для покриття власних потреб електроспоживання. Оскільки на РДН України як розрахунковий період (такий, для якого визначається ціна купівлі/продажу електроенергії) прийнятий період в одну годину [2], то й у цільовій функції розрахунки різниці між вигодою та витратами розраховується окремо на кожен годину доби:

$$\text{Max}(B_D^{\text{ГЕС}}) = \sum_{h=1}^{24} \left(\text{Prof}_{\text{прод}}(V_h^{\text{ГЕС}}) - \text{Cost}_{\text{куп}}(V_h^{\text{ГЕС}}) \right), \quad (1)$$

де $V_h^{\text{ГЕС}}$ – обсяг відпуску електроенергії генераторами ГЕС у розрахункову годину h ; $\text{Prof}_{\text{прод}}(V_h^{\text{ГЕС}})$ – функція розрахунку вигоди від продажу погодинного обсягу електричної енергії $V_h^{\text{ГЕС}}$ в ринкових сегментах; $\text{Cost}_{\text{куп}}(V_h^{\text{ГЕС}})$ – функція розрахунку витрат на закупівлю електроенергії для покриття власних потреб при виробництві електричної енергії обсягом $V_h^{\text{ГЕС}}$.

Вигода від продажу електричної енергії на РДН узагальнено визначається добутком обсягу проданої електроенергії на ціну, за якою енергогенеруюча компанія фактично отримала фінансові надходження:

$$\text{Prof}_{\text{прод}}(V_h^{\text{ГЕС}}) = C_{\text{прод},h}^{\text{ГЕС}} \cdot V_h^{\text{ГЕС}} \forall h = [1..24],$$

де $C_{\text{прод},h}^{\text{ГЕС}}$ – ціна, за якою визначаються фактичні фінансові надходження від продажу електроенергії.

Основні складові ціни електричної енергії, за якою розраховуються фінансові надходження для енергогенеруючої компанії, формується з таких основних складових:

$$C_{\text{прод},h}^{\text{ГЕС}} = C_h^{\text{РДН}} - T^{\text{ОР}} - T_{\text{П}}^{\text{ОСП}} - T_{\text{ДУ}}^{\text{ОСП}}, \quad (2)$$

де $C_h^{\text{РДН}}$ – прогнозована гранична ціна у сегменті РДН у годину h ; $T^{\text{ОР}}$ – тариф на послуги оператора ринку; $T_{\text{П}}^{\text{ОСП}}$ – тариф на послуги оператора системи передачі в частині передачі електричної енергії; $T_{\text{ДУ}}^{\text{ОСП}}$ – тариф на послуги оператора системи передачі в частині диспетчерського управління.

Тарифи на послуги оператора ринку і оператора системи передачі дають змогу більш точно розрахувати фактичну суму фінансових надходжень від продажу електричної енергії. Таке уточнення впливає на результати розв'язання задачі розподілу наявних гідроресурсів на виробництво електричної енергії протягом доби в тих випадках, коли математична модель функціонування генераторів ГЕС подається функціями з нелінійною залежністю витрат від рівня завантаження генераторів. Якщо модель функціонування генераторів ГЕС подається лінійними функціями, в яких приведені до одиниці відпуску електроенергії витрати не залежать від рівня завантаження генераторів, тарифи оператора ринку та оператора системи передачі не впливають на результати розподілу наявних ресурсів за годинами доби для виробництва електричної енергії. Тому в лінійних моделях функціонування генераторів ГЕС достатньо використовувати лише прогнозовані значення погодинних цін у сегменті РДН для оцінки вигоди від продажу та відпуску електричної енергії:

$$\text{Prof}_{\text{прод}}(V_h^{\text{ГЕС}}) = C_{\text{прод},h}^{\text{ГЕС}} \cdot V_h^{\text{ГЕС}} \rightarrow C_h^{\text{РДН}} \cdot V_h^{\text{ГЕС}} \forall h = [1..24].$$

Фінансові витрати, пов'язані з реалізацією технологічних процесів виробництва електричної енергії, пов'язуються передусім із закупівлею електричної енергії на покриття живлення власних потреб ГЕС:

$$Cost_{\text{куп}}(V_h^{\text{ГЕС}}) = C_{\text{куп},h}^{\text{ГЕС}} \cdot \Delta V_h^{\text{ГЕС}}(V_h^{\text{ГЕС}}) \forall h = [1..24],$$

де $C_{\text{куп},h}^{\text{ГЕС}}$ – ціна закупівлі електричної енергії на забезпечення живлення власних потреб ГЕС у годину h ; $\Delta V_h^{\text{ГЕС}}(V_h^{\text{ГЕС}})$ – обсяг електроспоживання власних потреб ГЕС у годину h .

Структура ціни закупівлі електричної енергії на покриття живлення власних потреб ГЕС має такі основні складові:

$$C_{\text{куп},h}^{\text{ГЕС}} = C_h^{\text{РДН}} + T^{\text{ОР}} + T_{\Pi}^{\text{ОСП}} + T^{\text{Пост}} \forall h = [1..24], \quad (3)$$

де $C_h^{\text{РДН}}$ – прогнозована гранична ціна в сегменті РДН у годину h ; $T^{\text{ОР}}$ – тариф на послуги оператора ринку; $T_{\Pi}^{\text{ОСП}}$ – тариф на послуги оператора системи передачі в частині передачі електричної енергії; $T^{\text{Пост}}$ – маржа електропостачальника.

Обсяг електроспоживання власних потреб ГЕС має нелінійну залежність, оскільки зі збільшенням рівня завантаження ГА на ГЕС нелінійно збільшуються також утрати електроенергії у схемі електричних з'єднань станцій. Тому для визначення формули розрахунку витрат на закупівлю електроенергії необхідно дослідити та визначити залежності витрат електроенергії та вплив цих залежностей на цільову функцію (1).

Функція витрат електроенергії на власні потреби ГЕС.

У структурі витрат на функціонування електростанції зазвичай виділяють постійну складову, яка не змінюється в різних режимах роботи електростанції та змінну складову, яка залежить від рівнів завантаження генераторів електростанції [8]. Незамінна складова витрат не впливає на результати розподілу наявних гідроресурсів для виробництва електроенергії протягом доби й тому не враховується в математичній моделі оптимізації. Для ГЕС основу витрат на реалізацію режимів виробництва електроенергії формує вартість електричної енергії, закупленої з метою покриття власних потреб електроспоживання. У структурі власних потреб електроспоживання ГЕС також можливо виділити деяку незмінну складову, яку можна не враховувати в математичній моделі оптимізації та складову електроспоживання, яка залежить від режимів завантаження ГА.

Таким чином, у публікації під витратами на власні потреби розуміється вартість тих обсягів електроенергії, які стосуються електроспоживання виробничого устаткування ГЕС у різних режимах завантаження ГА. Усі інші складові витрат (зокрема загальне станційне електроспоживання) визначені як постійна складова витрат і в математичній моделі оптимізації не враховуються. Розглянемо особливості врахування лінійної та нелінійної характеристик витрат електричної енергії на власні потреби ГА на ГЕС (рис. 2) у цільовій функції (1).

Для побудови функцій розрахунку обсягів технологічних витрат електричної енергії залежно від завантаження ГА на ГЕС використано такі припущення:

– припускаємо, що технологічні витрати стану готовності ГА на ГЕС ураховуються як складова загальних станційних витрат, тому для ГА у стані «в резерві» технологічні втрати електроенергії прирівнюються нулю;

– припускаємо, що витрати електричної енергії характеризуються лінійною або квадратичною залежністю від потужності завантаження ГА на ГЕС.

Останнє припущення вносить методичну похибку в математичну модель. У дійсності технологічні втрати електроенергії характеризуються передусім



Рис. 2. Характеристики споживання власних потреб ГЕС залежно від завантаження ГА

утратами електроенергії, тобто мають квадратичну залежність від струмів завантаження ГА. Залежність технологічних утрат електроенергії від потужності завантаження ГА на ГЕС, хоч і має нелінійний характер, але її кривизна менша за кривизну квадратичної залежності. У статті квадратична залежність використана виключно з метою прикладу використання нелінійних функцій у (1) з огляду на простоту формального подання квадратичної залежності. Під час розв'язання практичних задач планування режимів роботи ГЕС визначається нелінійна функція, яка найбільш адекватно визначає обсяги електроспоживання власних потреб у різних режимах роботи ГЕС.

Водночас лінійна залежність від рівнів завантаження ГА на ГЕС суттєво спрощує формальне подання математичної моделі, але в такому випадку методична похибка визначається лінеаризацією функції витрат електроенергії в схемах електричних з'єднань ГЕС.

Як вхідні дані для побудови функції технологічних витрат електроенергії в ГА на ГЕС взято дві основні режимні характеристики:

– за початкову точку графіка функції взято стан нульового відпуску електроенергії від ГЕС $P_{\text{ген}}^{\text{ГЕС}} = 0$, за якого технологічні витрати електричної енергії прирівнюються до значення витрат на забезпечення режиму холостого ходу $\Delta S(0) = \Delta S_{\text{ген,хх}}^{\text{ГЕС}}$;

– режим максимального завантаження ГА на ГЕС $P_{\text{ген}}^{\text{ГЕС}} = P_{\text{ген,макс}}^{\text{ГЕС}}$ характеризується максимальним значенням технологічних витрат електричної енергії $\Delta S(P_{\text{ген,макс}}^{\text{ГЕС}}) = \Delta S_{\text{ген,макс}}^{\text{ГЕС}}$.

Лінійна характеристика витрат власних потреб ГА на ГЕС визначається за формулою лінії:

$$f^{(1)}(P_{\text{ген,}h}^{\text{ГЕС}}) = A_{\Delta S(1)}^{\text{ГЕС}} \cdot P_{\text{ген,}h}^{\text{ГЕС}} + B_{\Delta S}^{\text{ГЕС}} \left[\begin{aligned} A_{\Delta S(1)}^{\text{ГЕС}} &= \frac{\Delta S_{\text{ген,макс}}^{\text{ГЕС}} - \Delta S_{\text{ген,хх}}^{\text{ГЕС}}}{P_{\text{ген,макс}}^{\text{ГЕС}}} \quad \forall h = [1..24], \\ B_{\Delta S}^{\text{ГЕС}} &= \Delta S_{\text{ген,хх}}^{\text{ГЕС}} \end{aligned} \right. \quad (4)$$

Де $\Delta S_{\text{ген,макс}}^{\text{ГЕС}}$ – технологічні витрати електроенергії у режимі максимального завантаження ГА на ГЕС; $\Delta S_{\text{ген,хх}}^{\text{ГЕС}}$ – технологічні витрати електроенергії у режимі холостого ходу ГА на ГЕС; $P_{\text{ген,макс}}^{\text{ГЕС}}$ – максимальна потужність ГА на ГЕС; $P_{\text{ген,}h}^{\text{ГЕС}}$ – потужність завантаження ГА на ГЕС у розрахункову годину h .

Для дотримання умов проходу характеристики витрат через дві задані точки мінімуму й максимуму квадратична характеристика технічних витрат електроенергії в ГА на ГЕС має описуватися функцією:

$$f^{(2)}(P_{\text{ген,}h}^{\text{ГЕС}}) = A_{\Delta S(2)}^{\text{ГЕС}} \cdot (P_{\text{ген,}h}^{\text{ГЕС}})^2 + B_{\Delta S}^{\text{ГЕС}} \left[\begin{aligned} A_{\Delta S(2)}^{\text{ГЕС}} &= \frac{\Delta S_{\text{ген,макс}}^{\text{ГЕС}} - \Delta S_{\text{ген,хх}}^{\text{ГЕС}}}{(P_{\text{ген,макс}}^{\text{ГЕС}})^2} \quad \forall h = [1..24], \\ B_{\Delta S}^{\text{ГЕС}} &= \Delta S_{\text{ген,хх}}^{\text{ГЕС}} \end{aligned} \right. \quad (5)$$

Ненульове значення витрат електроенергії у режимі холостого ходу ГА на ГЕС дає змогу виокремлювати в задачах оптимізації стани холодного й гарячого резервів для ГА на ГЕС. Якщо в розрахунках особливості цих станів не враховуються, тоді витрати електроенергії у режимі холостого ходу визначаються як незмінна складова балансу електричної енергії. Сума платежів на закупівлю цього обсягу електричної енергії в різні години доби залежать від значень погодинних ринкових цін. Але ця складова витрат не залежить від рівня завантаження ГА ГЕС. Тому сумарні за добу витрати на закупівлю електричної енергії для покриття витрат режиму холостого ходу ГА на ГЕС не змінюються залежно від результатів розв'язання задачі розподілу наявних гідроресурсів для виробництва електроенергії і ніяк не впливають на цільову функцію задачі оптимізації:

$$\sum_{h=1}^{24} (C_{\text{куп,}h}^{\text{ГЕС}} \cdot \Delta S_{\text{ген,хх}}^{\text{ГЕС}}) = \Delta S_{\text{ген,хх}}^{\text{ГЕС}} \cdot \sum_{h=1}^{24} C_{\text{куп,}h}^{\text{ГЕС}} \rightarrow \text{const.}$$

Таким чином, якщо в розрахунках не враховується різниця витрат у станах холодного і гарячого резервів ГА на ГЕС, то витрати електроенергії у режимі холостого ходу ГА на ГЕС (4) і (5) можна не враховувати в розрахунках:

$$\Delta S_{\text{ген,хх}}^{\text{ГЕС}} = 0 \rightarrow B_{\Delta S}^{\text{ГЕС}} = 0.$$

За незмінного режиму роботи ГА обсяг відпущеної протягом розрахункової години електроенергії чисельно відповідатиме значенню потужності завантаження ГА:

$$V_h^{\text{ГЕС}} = 1 \cdot P_{\text{ген,}h}^{\text{ГЕС}},$$

де 1 – формальний коефіцієнт для перерахунку від розмірності потужності (МВт) у розмірність обсягу електроенергії (МВт·год) за незмінного режиму завантаження ГА протягом розрахункової години.

Тоді, ураховуючи лінійну характеристику витрат електроенергії на ГЕС (4), отримуємо цільову функцію (1) у вигляді:

$$\text{Max}(B_D^{\text{ГЕС}}) = \sum_{h=1}^{24} (C_{\text{прод,}h}^{\text{ГЕС}} \cdot V_h^{\text{ГЕС}} - C_{\text{куп,}h}^{\text{ГЕС}} \cdot (A_{\Delta S(n)}^{\text{ГЕС}} \cdot V_h^{\text{ГЕС}} + B_{\Delta S}^{\text{ГЕС}})).$$

Виділяючи різницю значень погодинних цін та погодинний відпуск електроенергії в окремі множники, маємо:

$$\text{Max}(B_D^{\text{ГЕС}}) = \sum_{h=1}^{24} ((C_{\text{прод,}h}^{\text{ГЕС}} - C_{\text{куп,}h}^{\text{ГЕС}} \cdot A_{\Delta S(n)}^{\text{ГЕС}}) \cdot V_h^{\text{ГЕС}} + C_{\text{куп,}h}^{\text{ГЕС}} \cdot B_{\Delta S}^{\text{ГЕС}}). \quad (6)$$

Як зазначалося вище, складова $B_{\Delta S}^{\text{ГЕС}}$ може впливати на результати розв’язання задачі оптимального розподілу наявних гідроресурсів на виробництво електричної енергії лише за умови врахування різниці витрат на споживання власних потреб у станах холодного і гарячого резервів ГА на ГЕС. Аналогічно складова $C_{\text{куп,}h}^{\text{ГЕС}} \cdot A_{\Delta S(n)}^{\text{ГЕС}}$ розраховується на етапі підготовки до процедури оптимізації і в процесі оптимізації не змінюється. Тому використання складової $C_{\text{куп,}h}^{\text{ГЕС}} \cdot A_{\Delta S(n)}^{\text{ГЕС}}$ у (6) дає змогу уточнити суму вигоди від продажу електричної енергії, відпущеної генераторами ГЕС. Для оцінки впливу чисельних значень цієї складової на результати розв’язання задачі оптимального розподілу наявних гідроресурсів для виробництва електричної енергії деталізуємо формальне подання різниці цін у (6) рівняннями (2) та (3):

$$\begin{aligned} C_{\text{прод,}h}^{\text{ГЕС}} - C_{\text{куп,}h}^{\text{ГЕС}} \cdot A_{\Delta S(n)}^{\text{ГЕС}} &= C_h^{\text{РДН}} - T^{\text{ОР}} - T_{\Pi}^{\text{ОСП}} - T_{\text{ДУ}}^{\text{ОСП}} - (C_h^{\text{РДН}} + T^{\text{ОР}} + T_{\Pi}^{\text{ОСП}} + T^{\text{Пост}}) \cdot A_{\Delta S(n)}^{\text{ГЕС}} \\ &= C_h^{\text{РДН}} \cdot (1 - A_{\Delta S(n)}^{\text{ГЕС}}) - T^{\text{ОР}} \cdot (1 + A_{\Delta S(n)}^{\text{ГЕС}}) - T_{\Pi}^{\text{ОСП}} \cdot (1 + A_{\Delta S(n)}^{\text{ГЕС}}) - T_{\text{ДУ}}^{\text{ОСП}} - T^{\text{Пост}} \cdot A_{\Delta S(n)}^{\text{ГЕС}}. \end{aligned}$$

Погодинні ринкові ціни впливають лише на значення складової $C_h^{\text{РДН}} \cdot (1 - A_{\Delta S(n)}^{\text{ГЕС}})$, формуючи для кожної розрахункової години окремі вагові коефіцієнти в задачі оптимального розподілу наявних гідроресурсів для виробництва електроенергії. Водночас, оскільки різниця $(1 - A_{\Delta S(n)}^{\text{ГЕС}})$ не змінюється для окремого ГА на ГЕС, то ця складова впливатиме лише на чисельне значення цільової функції і не впливатиме на результати розподілу наявних гідроресурсів за різних ринкових цін. Всі інші адитивні складові не змінюються для різних годин доби і не залежать від режимів функціонування ГА на ГЕС.

Таким чином, лінійна характеристика витрат електроенергії для ГА на ГЕС може впливати на результати розв’язання задачі оптимального вибору складу обладнання для реалізації заданого графіка виробництва електроенергії, але не впливає на результати розв’язання задачі оптимального розподілу наявних гідроресурсів для виробництва електричної енергії годинами доби за ціновими критеріями. Тому для ГЕС з однотипними генераторами та за використання еквівалентного генератора ГЕС у задачі оптимального розподілу наявних гідроресурсів для виробництва електричної енергії годинами доби за ціновими критеріями лінійна характеристика витрат не впливає на результат і може не враховуватись.

Підставляючи квадратичну характеристику обсягів власного споживання електричної енергії залежно від рівня завантаження ГА на ГЕС (5) у цільову функцію (1), маємо:

$$Max(B_D^{ГЕС}) = \sum_{h=1}^{24} \left(C_{\text{прод},h}^{ГЕС} \cdot V_h^{ГЕС} - C_{\text{куп},h}^{ГЕС} \cdot \left(A_{\text{АС(п)}}^{ГЕС} \cdot (V_h^{ГЕС})^2 + B_{\text{АС}}^{ГЕС} \right) \right). \quad (7)$$

Уточнимо основні типи аргументів цільової функції (7) та джерела для отримання їхніх значень. Витрати електроенергії на забезпечення режимів холостого ходу і максимального завантаження ГА, а також максимальна потужність завантаження ГА відносяться до технічних характеристик ГА. Ціни продажу (2) та купівлі (3) електроенергії розраховуються на етапі підготовки до процедури оптимізації. Водночас використовуються чинні тарифи послуг Оператора ринку і Оператора системи передачі, встановлені НКРЕ КП. У (2) та (3) використовуються прогнозовані значення погодинних цін у сегменті РДН. Погодинні обсяги відпуску електроенергії є змінними оптимізації.

Квадратична характеристика витрат на живлення власних потреб генераторів ГЕС зменшує значення додаткової економічної вигоди від збільшення рівня завантаження генераторів ГЕС (порівняно з результатами, отриманими за використання лінійних характеристик витрат на власні потреби ГА на ГЕС), що стимулює до вирівнювання графіків відпуску електроенергії у години з незначними коливаннями ринкових цін. Водночас, як показали практичні розрахунки, застосування квадратичної характеристики витрат на живлення власних потреб генераторів ГЕС призводить до отримання добових графіків із однаковими рівнями завантаження в години з однаковими ринковими цінами. Тобто, застосування квадратичної характеристики витрат на живлення власних потреб генераторів ГЕС усуває потребу у виконанні додаткової оптимізації за неціновими критеріями для годин з однаковими ринковими цінами.

Система обмежень для задачі оптимізації.

Система обмежень для розв'язання задачі оптимального розподілу наявних гідроресурсів розрахунковими годинами доби в цілому відповідає наведеній у [7] математичній моделі. Розглянемо коротко цю систему обмежень для формування єдиної розрахункової моделі з цільовими функціями (6) чи (7).

Допустимі рівні завантаження генераторів ГЕС:

$$V_{\min}^{ГЕС} \leq V_h^{ГЕС} \leq V_{\max}^{ГЕС} : \forall h = [1..24],$$

де $V_{\min}^{ГЕС}$, $V_{\max}^{ГЕС}$ – відповідно мінімальний та максимальний обсяги відпуску електроенергії для ГЕС за екологічними умовами стоку води, обсягами вже проданої електроенергії та умовами режимів ОЕС України.

Рівняння балансу гідроресурсів визначають обмеження потоків води. Зв'язок між обсягом електричної енергії та потоком води визначається залежністю:

$$V_h^{ГЕС} = \frac{F_{\text{витр},h}^{ГЕС}}{\gamma_c^{ГЕС}} : \forall h = [1..24],$$

де $F_{\text{витр},h}^{ГЕС}$ – витрати води на виробництво електричної енергії у розрахункову годину доби h (м^3), $\gamma_c^{ГЕС}$ – середні витрати води на виробництво електричної енергії для ГЕС ($\text{м}^3/\text{МВт}\cdot\text{год}$).

Обмеження балансів гідроресурсів призначено для контролю погодинних рівнів заповнення водосховища та зведення загального за добу балансу. Контроль погодинних рівнів заповнення водосховища реалізується залежностями:

$$W_{\min}^{B,CX} \leq W_{\text{поч}}^{B,CX} + \sum_{h=1}^k (F_{\text{вх},h}^{B,CX} - F_{\text{витр},h}^{ГЕС}) \leq W_{\max}^{B,CX} : \forall k = [1..24],$$

де $W_{\min}^{B,CX}$, $W_{\max}^{B,CX}$ – відповідно технологічні мінімум та максимум заповнення водосховища (м^3), $W_{\text{поч}}^{B,CX}$ – рівень заповнення водосховища на початок доби; $F_{\text{вх},h}^{B,CX}$ – вхідний потік води у водосховище за розрахункову годину доби h (м^3), $F_{\text{витр},h}^{ГЕС}$ – витрати води для виробництва електричної енергії на ГЕС у годину h (м^3).

Зведення загального за добу балансу гідроресурсів

$$\sum_{h=1}^{24} (F_{\text{вх},h}^{\text{в.сх}} - F_{\text{втр},h}^{\text{ГЕС}}) = W_{\text{кін}}^{\text{в.сх}} - W_{\text{поч}}^{\text{в.сх}},$$

де $W_{\text{кін}}^{\text{в.сх}}$ – рівень заповнення водосховища на кінець доби (м^3).

Різниця між кінцевим та початковим рівнями наповнення водосховища у правій частині рівності разом із прогнозом надходження води протягом доби визначають обсяг гідроресурсів, використання якого необхідно розподілити окремими годинами для отримання оптимального результату.

Використання функцій вартості електроспоживання в задачах планування графіків завантаження ГЕС.

Для оцінки результатів розв’язання задачі планування витрат наявних гідроресурсів за розрахунковими годинами доби для виробництва електричної енергії на ГЕС використано вхідні дані, наведені в [7]. Результати оптимізації, виконаної із використанням цільових функцій (6) і (7), відображені на рис. 3 і в цілому ідентичні результатам, отриманим у [7].

Лінійна функція витрат на власні потреби ГЕС у (6) у цілому зберігає лінійність математичної моделі оптимізації. Тому, за результатами оптимізації отримується глобальний максимум цільової функції, але виникає ймовірність появи множини годин доби з однаковими ринковими цінами, для якої формується випадковий результат. Феномен появи множини годин доби з нескінченною множиною однаково оптимальних розв’язків у лінійній моделі оптимізації детально розглянуто в [7]. У межах цієї публікації лише зазначимо, що за використання лінійної функції розрахунку витрат власних потреб ГЕС зберігається лінійність математичної моделі. Це, зі свого боку, призводить до потреби виконання додаткових кроків оптимізації з використанням нелінійних функцій, наприклад, наведених у [7] функцій штрафів.

Нелінійна функція розрахунку витрат власних потреб у (7) створює нелінійність математичної моделі для задачі планування витрат наявних гідроресурсів розрахунковими годинами доби для виробництва електричної енергії на ГЕС. Методи й засоби нелінійної оптимізації гарантують отримання лише локального екстремуму цільової функції, але, як показали практичні розрахунки, використання нелінійної функції розрахунку витрат власних потреб у (7) усуває проблему нескінченної множини однаково оптимальних розв’язків для годин доби з однаковими ринковими цінами. Відповідно зникає потреба в організації додаткових кроків оптимізації чи додаткових цілей із нелійними складовими цільової функції.

Висновки. Представлена в публікації математична модель дає змогу розв’язати задачу оптимального за ціновим критерієм розподілу наявних гідроресурсів для формування добового графіка завантаження генераторів гідроелектростанції з урахуванням плану підтримки рівня заповнення водосховища та технологічних обмежень. Водночас сформовано два варіанти математичних моделей із лінійною та нелінійною функціями розрахунку витрат на власні потреби електроспоживання ГЕС. Використання функції розрахунку витрат на власні потреби електроспоживання ГЕС дає змогу більш точно визначати суму вигоди від продажу

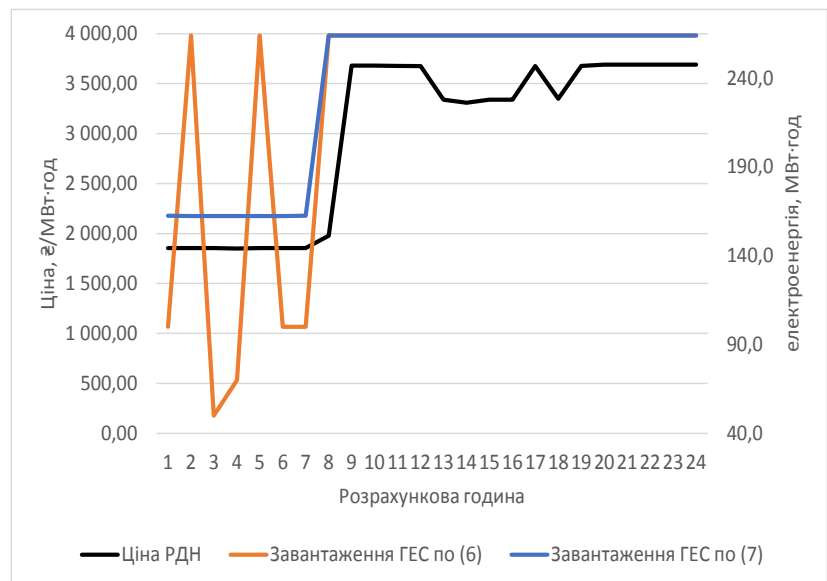


Рис. 3. Результати оптимального розподілу гідроресурсів із цільовими функціями (6) і (7)

електричної енергії та отримувати більш адекватні розв'язки задачі планування графіків завантаження ГЕС.

Як показали практичні розрахунки, лінійна функція розрахунку витрат на власні потреби електроспоживання ГЕС у цілому зберігає лінійність математичної моделі, що може призводити до появи нескінченної множини однаково оптимальних розв'язків для годин доби з однаковими ринковими цінами. Тому під час використання лінійної функції розрахунку витрат на власні потреби електроспоживання ГЕС необхідно вживати додаткові заходи для отримання адекватних результатів, зокрема виконання додаткових кроків оптимізації із використанням нелінійних функцій або використання в цільовій функції додаткових нелінійних функцій штрафів, як способу впровадження додаткової цілі оптимізації за неціновим критерієм.

Нелінійна функція розрахунку витрат на власні потреби електроспоживання ГЕС дає змогу отримати однакові рівні завантаження ГЕС у години з однаковими ринковими цінами, що створює результат, аналогічний результатам оптимізації із додатковим не ціновим критерієм, а саме критерієм вирівнювання завантаження ГЕС у години з однаковими ринковими цінами. Це, зі свого боку, позбавляє потреби запровадження в математичній моделі додаткових не цінових критеріїв оптимізації.

Роботу виконано в межах реалізації проєкту з виконання наукового дослідження і розробки «Моделі і засоби підвищення ефективності роботи гідро- та гідроакмулюючих електростанцій для балансування ОЕС України в умовах ринку електричної енергії та особливих технологічних обмежень» (реєстраційний номер 2022.01/0069), що фінансується Національним фондом досліджень України в межах конкурсу проєктів із виконання наукових досліджень і розробок «Наука для відбудови України у воєнний та повоєнний періоди» (КПКВК 2201300)

1. Про ринок електричної енергії. Закон України від 13.04.2017 №2019-VIII.
2. Про затвердження Правил ринку. Постанова НКРЕКП № 307 від 14.03.2018.6.
3. Про затвердження правил ринку «на добу наперед» та внутрішньодобового ринку. Постанова НКРЕКП № 308 від 14.03.2018.
4. Кириленко О.В., Павловський В.В., Блінов І.В. Науково-технічне забезпечення організації роботи ОЕС України в синхронному режимі з європейською континентальною енергетичною системою ENTSO-E. *Технічна електродинаміка*. 2022. № 5. С. 59–66. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.05.059>
5. Олефір Д.О., Бабіч В.Ю., Блінов І.В. Актуальні проблеми забезпечення ОЕС України ресурсами регулювання частоти та потужності. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2021. № 3. С. 39–46. DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.3.2021.251196>
6. Блінов І.В., Олефір Д.О., Парус Є.В. Модель оптимального використання ресурсів гідроелектростанцій на ринку електричної енергії. *Технічна електродинаміка*. 2022. № 2. С. 60–69. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.04.042>
7. Парус Є., Блінов І., Олефір Д. Формування графіка пропозиції ГЕС на ринку «на добу наперед» методами умовної оптимізації зі штрафними функціями. *Технічна електродинаміка*. 2023. № 6. С. 71–80. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2023.06.071>
8. Блінов І.В., Парус Є.В., Рибіна О.Б. Способи визначення плати електростанціям за готовність та фактичне надання послуг з первинного та вторинного регулювання частоти в Україні. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. 2012. № 33. С. 128–134.

DAILY OPTIMIZATION OF THE WORKING SCHEDULE OF THE HYDROELECTRIC PLANT TAKING INTO ACCOUNT THE NONLINEAR FUNCTION OF THE COSTS OF OWN NEEDS

D. Olefir, E. Parus, O. Rybina, V. Miroshnyk

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,

Beresteyskyi ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine

e-mail: d.olefir@uhe.gov.ua, paruseugene@gmail.com

A mathematical model of the daily distribution of the available hydro resources of the dam hydroelectric power station is presented, taking into account the non-linear function of technological costs of electrical energy. The profit function from the sale of electric energy in the Day-ahead market is given. A linear and non-linear function of costs for the purchase of electric energy to cover the own power consumption needs of HPP generators under different modes of their loading is presented. The objective function of the profit from the sale of electricity on the day-ahead market is presented, taking into account the cost of purchasing electricity to cover the technological needs of the operation of hydro-power generators in different loading modes. The system of limitations of hydro resources in the technological node

"Reservoir - HPP" is given. Test calculations were performed using the presented mathematical models and the results of such calculations were analyzed. Ref. 8, fig. 3.

Keywords: hydropower plants, optimization, electricity market, day-ahead market.

1. On Electricity Market: The Law of Ukraine. 13.04.2017 No 2019-VIII. (Ukr)
2. About the statement of Rules of the market. Resolution of National energy and regulatory commission, Ukraine, of March 14, 2018. No 307. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0307874-18#Text> (Ukr)
3. Rules day-ahead market and intraday market: Decree NKREKP 14.03.2018. No 308 (revision on 24.06.2019 No 1169). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0308874-18#Text> (Ukr)
4. Kyrylenko O.V., Pavlovsky V.V., Blinov I.V. Scientific and technical support for organizing the work of the IPS of Ukraine in synchronous mode with the Continental European power system ENTSO-E. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2022. No 5. Pp. 59–66. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.05.059> (Ukr)
5. Olefir D., Babich V., Blinov I. Current problems of providing frequency and power regulation resources to IPS of Ukraine. *Power engineering: economics, technique, ecology*. 2021. No 3. Pp. 39–46 DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.3.2021.251196> (Ukr)
6. Blinov I., Olefir D., Parus E. Model of optimal use of hydro power plants in the electricity market. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2022. No 2. Pp. 42–47. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.04.042> (Ukr)
7. Parus E.V., Blinov I.V., Olefir D. Formation of the schedule of the hydropower offer for the "day ahead" market using conditional optimization methods with penalty functions. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2023. No 6. Pp. 71–80. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2023.06.071> (Ukr)
8. Blinov I.V., Parus E.V., Rybina O.B. Methods of payment for power station for readiness and actual provision of services of primary and secondary frequency control in Ukraine. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky NAN Ukrainy*. 2012. No 33. Pp. 128–134. (Ukr)

Надійшла: 29.08.2024

Прийнята: 24.09.2024

Submitted: 29.08.2024

Accepted: 24.09.2024

МОНІТОРИНГ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ В ЛОКАЛЬНИХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ

С.П. Денисюк*, докт. техн. наук, Г.С. Белоха**, канд. техн. наук, К.М. Гілевич***, І.С. Чернечук****

Національний технічний університет України Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського
пр. Берестейський, 37, Київ, Україна,
e-mail: pointage13@gmail.com

Локальна електроенергетична система є децентралізованою мережею, одним із завдань якої є оптимізоване керування розподіленими енергетичними ресурсами. Для досягнення ефективної інтеграції та взаємодії в роботі локальних систем на рівні житлових будинків та комерційних будівель слід розробити необхідний набір систем, алгоритмів, які об'єднуються в системи моніторингу. Транзактивна енергетична система дозволяє кільком взаємопов'язаним будівлям обмінюватися енергією для більшої енергоефективності. У статті представлено особливості моніторингу таких систем, методика оцінки ефективності локальної системи та оцінка нерівномірності графіків енергоспоживання при електроживленні елементів локальної системи. Розглянуто впровадження сучасних програм (механізмів) керування попитом (Demand Side Management) для участі у балансуванні попиту та пропозиції. Розглянуто застосування механізмів керування попитом для локальної системи з неінтрузивним моніторингом та з системою енергоменеджменту на основі підходів та методів транзактивної енергії. Проведені розрахунки показали можливості зниження вартості електроенергії для споживачів до 12,5 %. Бібл 14, рис. 2.

Ключові слова: неінтрузивний моніторинг, локальна електроенергетична система, розосереджені енергетичні ресурси, відновлювані джерела енергії.

Введення. Інтеграція відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) є одним із основних напрямків трансформації електроенергетичної системи. Традиційний централізований спосіб виробництва та керування електроенергією замінюється децентралізованим способом. Локальна електроенергетична система (ЛЕС) є децентралізованою мережею, одним із завдань якої є оптимізоване керування розподіленими енергетичними ресурсами (РЕР). Локальні системи складаються з джерел розподіленої генерації, систем зберігання енергії, навантаження та іншого обладнання. Будівлі як комерційні, так і житлові є найбільш поширеним навантаженням.

Активні споживачі, які є частиною локальних систем з власним ВДЕ, можуть брати участь у різних програмах реагування на попит (DSM – demand side management) та на ринках електроенергії завдяки сприятливим умовам і програмам стимулювання. Однак цими ВДЕ керують споживачі (або окремі власники), вони є самоконтрольованими з точки зору електромережі, тому звичайним програмам DSM часто не вдається повністю розкрити потенціал гнучкості таких активних споживачів [1].

Для модернізації мережі використовується концепція «Smart Grid». Житлові та комерційні будівлі отримують вигоду від модернізованої мережі, включаючи покращену безпеку, зниження пікових навантажень, більшу інтеграцію ВДЕ та зниження експлуатаційних витрат. Споживачі можуть ефективно керувати власним профілем енергоспоживання та швидко реагувати на сигнали ринку, особливо для будівель з РЕР та системою керування енергією «Smart Building». Окрім технологій Smart Grid та Smart Building для максимального розкриття потенціалу будівель Gridwise Architecture (GWAC) визначає ще один вид побудови локальних систем – Transactive Energy (Транзактивна енергія (ТЕ)), що є системою економічних механізмів і механізмів керування, які дозволяють динамічно балансувати попит і пропозицію в усій електричній інфраструктурі, використовуючи вартість як ключовий робочий параметр [2–4].

Споживачі збалансовують потреби та бажання з ціною, доступністю та зручністю використання електроенергії та відповідних пристроїв, а також збалансовують економічні цілі



своїх організацій з фізичними, нормативними та ринковими обмеженнями. GWAC узагальнили застосованість транзактивної енергії для житлових будинків – нові можливості вибору споживачів (клієнти можуть вибрати: брати участь у адаптації попиту для зниження загальних витрат на енергію, виробляти та продавати надлишкову енергію та послуги, купувати енергію з багатьох джерел на основі вартості, користуватися перевагами нових енергетичних послуг).

Для досягнення ефективної інтеграції та кооперації в роботі локальних систем на рівні житлових будинків та комерційних будівель необхідний набір систем, алгоритмів, який є частиною систем моніторингу та енергетичного менеджменту.

Міжнародними стандартами на організацію роботи локальних систем представлені вимоги стандарту щодо керування ними [5]:

- енергетичний менеджмент (год, хв): генерація електроенергії та прогноз навантаження, економічна та екологічна оптимізація диспетчеризації, ринкові транзакції, управління попитом, обмін потужністю та електроенергією з передовою мережею; збір і обробка даних, управління базами даних;

- моніторинг і контроль (хв, с): збір і обробка даних, управління базою даних; блокування несправності, локальний контроль якості електроенергії, керування перемикачем пристроїв, послідовність операцій, регулювання частоти/напруги під час нормальної роботи, контроль активної та реактивної потужності пристроїв, перемикач режимів, «чорний» пуск, відновлення системи, синхронізація часу; виявлення острівного режиму (наприклад, втрата основного захисту), контроль стабільності частоти (острівного режиму), динамічний контроль завад (від 50 мс до 2 с), контроль стабільності напруги.

У [6] розглянуто сучасний енергетичний менеджмент – це проактивна, організована та систематична координація закупівлі, перетворення, розподілу та використання енергії для задоволення вимог, беручи до уваги екологічні та економічні цілі.

Складові систем енергоменеджменту для локальних систем:

- моніторинг (фактичне виробництво енергії, фактичний попит на енергію, стан заряду накопичувача для зберігання енергії, невизначеність ціни);

- прогноз (виробництво енергії, попит на енергію, мобільне зберігання даних, невизначеність);

- керування якістю електроенергії (мінімізація втрат, показники якості електроенергії, надійність/комфортність);

- планування/диспетчеризація/вартість (операційні витрати, зменшення викидів парникових газів (ПГ), максимізація прибутку).

У рамках розвитку теорії моніторингу електроенергетичних систем в [7] запропоновано нову систему принципів та процедур, покладених в основу побудови систем Smart-моніторингу сучасних інтелектуальних децентралізованих електроенергетичних систем. Принципи побудови та реалізації Smart-моніторингу є поєднанням технічної (технологічної) та економічної ефективності.

При визначенні ефективного використання інтелектуальних пристроїв та систем моніторингу також важливо подумати про загальні способи, методи, якими інтегровані пристрої, системи, процеси, будівлі тощо можуть пропонувати цінні послуги, коли вони підключені до енергетичних ринків і операторів мереж і спілкуються з ними.

З точки зору енергетичних операцій і ринку, гнучкість диспетчеризації інтегрованих у мережу будівель може допомогти вирішити проблеми, що виникають через регіональні обмеження, перевантаження, стрибки цін і надлишок відновлюваної енергії.

Аналіз сучасного стану організації систем моніторингу показує, що основним завданням проектування систем енергоменеджменту та систем моніторингу житлових будинків є знаходження балансу між суперечливими цілями споживачів і керуванням електричними пристроями в будівлях для максимальної гнучкості використання на основі вподобань споживача.

Мета роботи – аналіз особливостей організації систем моніторингу ефективності роботи локальних енергетичних систем та будівель з вирішенням задачі балансування попиту

та пропозиції, використанням програм керування попитом та оцінці нерівномірності графіків енергоспоживання з використанням сучасних систем побудови локальних систем.

Матеріали досліджень.

Моніторинг і керування споживанням має дві різні мети. По-перше, з точки зору споживача або мешканця, наявність інформації про рівень використання приладів може призвести до зниження витрат через зменшення споживання енергії або можливих допоміжних послуг (запити на дисбаланс, регулювання навантаження або коливання цін на електроенергію тощо). По-друге, з точки зору інтелектуальної мережі або менеджера (агрегатора) мережі керуваність більшою кількістю навантажень надає більше можливостей дій для підтримки стабільності мережі, тобто більшій гнучкості та надійності (зменшення пікового попиту шляхом усунення використання електроенергії, або шляхом перенесення його на непіковий час тощо) шляхом ідентифікації навантаження та прогнозування споживання енергії навантаженням.

Методологія Smart моніторингу передбачає застосування системи неінтрузивного моніторингу навантаження (NILM) та складається з простішої апаратної частини та складнішого програмного забезпечення, ніж інтрузивний. Smart моніторинг передбачає розробку методів інтрузивного моніторингу та методів неінтрузивного моніторингу навантаження, необхідних для вирішення проблеми дезагрегування навантаження [8].

Неінтрузивний моніторинг є потужною технікою з потенціалом значного підвищення енергоефективності та зменшення споживання енергії. Він є методом аналізу даних про загальне електричне навантаження, отриманих шляхом вимірювання сили струму та напруги в одній точці, з наступним поділом загального навантаження на навантаження окремих пристроїв, які входять до складу навантажень будівель.

Системи моніторингу включають різні типи технологічних компонентів, включаючи інтелектуальні лічильники, локальні контролери, датчики, перемикачі навантаження та графічні інтерфейси користувача. Розумні лічильники та інтервальні лічильники діють як точка доступу для постачальників комунальних послуг та агрегаторів. Вони дозволяють вимірювати відхилення енергії через реакцію на попит для успішного виставлення рахунків та успішної розробки стимулів/винагород, але вони також можуть виступати як графічний інтерфейс. Графічні інтерфейси є важливими пристроями визначення профілів навантаження споживачів, оскільки вони дають змогу кінцевому споживачеві віддалено взаємодіяти зі своїми пристроями і, таким чином, вирішувати підключати йому навантаження або відключати.

Інтелектуальні лічильники в системі неінтрузивного моніторингу та системи енергоменеджменту будинку можна використовувати для надання споживачам зворотного зв'язку щодо споживання енергії в режимі реального часу безперервно або через регулярні проміжки часу.

Системи моніторингу та системи енергоменеджменту житлових будинків є критично важливим елементом для ефективного використання гнучкості побутових споживачів, оскільки це сприятиме активній участі споживачів у структурі ТЕ для досягнення економічної вигоди.

Виділимо основні функції систем моніторингу ефективності:

- збір і обробка даних, включаючи збір даних у реальному часі щодо розподіленої генерації, навантаження, трансформаторів і пристроїв компенсації реактивної потужності, а також розрахунок і аналіз отриманих даних;
- керування базами даних, включаючи безпосередню обробку, синхронізацію, резервне копіювання та відновлення отриманих даних, а також забезпечення інтеграції даних з іншими внутрішніми та зовнішніми програмами;
- оцінка та контроль якості електроенергії (збір інформації про вихід за діапазон показників напруги, коефіцієнта потужності, гармонік тощо; відповідний контроль якості електроенергії);
- регулювання активної та реактивної потужності, включаючи відключення навантаження (у разі потреби), розподіл навантаження та контроль активної та реактивної потужності в режимі реального часу в автоматичному або ручному режимі.

При організації систем моніторингу ефективності роботи необхідно приділити увагу вирішенню наступних задач:

- балансування попиту та пропозиції;
- впровадження сучасних програм (механізмів) керування попитом (Demand Side Management);
- оцінка нерівномірності графіків енергоспоживання за умов електроживлення елементів ЛЕС як на змінному, так і постійному струмі.

Будівлі як найбільші споживачі електроенергії повинні узгоджено працювати з мережею та реагувати на неї, а також бути гнучкими, щоб уникнути додаткового навантаження на баланс електромереж. Будівлі мають велику здатність до переносу навантаження, що дозволяє їм бути найбільш ефективними при балансуванні попиту та пропозиції. Навантаження в будівлях можна змінювати як за величиною, так і за часом відповідно до потреб локальної системи. Зміна використання електроенергії (або навіть експорт електроенергії в мережу) у будівлі може бути активовано автономно у відповідь на час використання та/або динамічне ціноутворення на електроенергію, або безпосередньо контролюватися оператором мережі (агрегатором). Потенціал будівель, які є частиною ТЕ, може бути використаний за допомогою взаємодії між будівлями та електромережею (B2G), інтеграції будівель і електромобілів (V2B) і обміну енергією між будівлями (B2B) [9-10].

Транзактивна енергетична мережа дозволяє кільком взаємопов'язаним будівлям (або певним об'єднанням будівель – кластерам) обмінюватися енергією для більшої енергоефективності. Дослідження показали, що будівельні кластери можуть досягти колективних інтересів (наприклад, мінімізація загальних витрат на енергію). Однак деяким окремим будівлям, можливо, доведеться пожертвувати своїми індивідуальними інтересами (наприклад, підвищенням вартості) заради колективних інтересів кластерів [2].

Особливістю моніторингу, заснованого на неінтрузивному моніторингу навантаження, є те, що лічильник такої системи моніторингу вимірює струм і напругу в одному місці розподільної електромережі будівлі та не вимагає прямого вбудовування в мережу, при цьому забезпечуючи точність вимірювання, що не поступається традиційним лічильникам. Лічильник NILM, використовуючи хмарні технології та спеціальні методи машинного навчання, розбиває інтегральні дані про споживання енергії, зібрані в одній точці мережі, на профілі споживання кожного пристрою [8].

NILM – це техніка моніторингу споживання енергії в будівлях без необхідності встановлення апаратного забезпечення на окремих приладах, що робить його економічно ефективним і масштабованим рішенням для підвищення енергоефективності та зниження споживання енергії.

Неоптимальність відбору від генератора та споживання навантаженнями електроенергії оцінимо з точки зору роботи локальної системи при живленні будівлі. Як критерій оцінки вибрано ступінь відхилення від рівномірного енергоспоживання по відношенню до середнього рівня передачі активної потужності за заданий інтервал часу. З цією метою застосовується реактивна потужність Фризе. Потужність Фризе дозволяє оцінити неоптимальність передачі електроенергії, а отже, й додаткових втрат. При деталізації втрат, зокрема причин їхньої зміни (зростання), важливим постає питання визначення причини появи чи зростання додаткових втрат. Найбільш укрупненим джерелом, яке сприяє появі додаткових втрат електроенергії, може бути як генератор, так і навантаження, що особливо актуальним є для локальних електроенергетичних систем [11].

Застосування модифікованої потужності Фризе Q_{Φ} дає змогу оцінити нерівномірність графіків енергоспоживання при електроживленні елементів ЛЕС як на змінному, так і постійному струмі.

Використовуючи метод оцінки неоптимальних рівнів генерації та споживання електроенергії будівлями за допомогою реактивної потужності Фризе Q_{Φ} , представимо розподіл цих навантажень на типи:

- великі (крупні одиничні або об'єднання будівель) навантаження – множина $\{A_i, i=1, \dots, n_A\}$;

– розпорошені (розосереджені побутові споживачі (багатоквартирні будинки) – $\{B_i, i = 1, \dots, n_B\}$.

Характеристика цих типів навантаження для оцінки елементів множин $\{A_i, i = 1, \dots, n_A\}$, $\{B_i, i = 1, \dots, n_B\}$.

Виділення чотирьох типів контрольованих перетинів:

- підключення централізованої мережі до ЛЕС (перетини «А–А»);
- підключення РЕР (перетини для РЕР змінного струму «В–В»; перетини для РЕР постійного струму «С–С»);
- підключення великих навантажень (перетини «D–D»);
- підключення кластерів – об'єднань розпорошених споживачів (багатоквартирних будинків) (перетини «С–С»).

Для кожного з виділених множин можна навести їхні характеристики та обмеження функціонування.

Наприклад, для перетинів «А–А» слід врахувати варіанти відбору: «оптимальність» на ненульовому інтервалі передачі енергії від централізованої мережі; «оптимальність» з врахуванням ненульового інтервалу передачі енергії від централізованої мережі, провести оцінку втраченої вигоди. А для перетинів «С–С» доцільно врахувати перехідні процеси та використовувати неінтрузивний моніторинг.

Для систем моніторингу представимо розроблену методику оцінки ефективності роботи ЛЕС. Під оцінкою ефективності будемо розуміти оптимізацію втрат електроенергії та оплати коштів за генерацію РЕР та споживання споживачами електроенергії. Результатом моніторингу є оптимізація енергетичних процесів.

Методика така:

- 1) Проведення попереднього збору даних. Оцінка того, що впливає на електроспоживання в будівлі (типи приладів (обладнання) та їхня кількість.
- 2) Введення інтегрованих показників ефективності: технічні (технологічні) та економічні.
- 3) «Розгортання» неоптимальності, починаючи від перетину підключення централізованої мережі до ЛЕС аж до кінцевих споживачів (вузла, де підключено кілька споживачів):

- визначення як неоптимальність може бути скомпенсована власними силами,
- внутрішня взаємокомпенсація у елемента.

- 4) Власна оптимізація, оптимізація з «сусідом» за технологією В2В.

- 5) Визначення балансуєної групи для усунення небалансу.
 - Балансування: вузол нижнього рівня; вузол вищого рівня; підсистема (кластер) система в цілому (взаємокомпенсація чи взаємодоповнення).

Балансування попиту та пропозиції:

- елементи множини $\{A_i, i = 1, \dots, n_A\}$ у вузлі;
- всередині кожного з елементів множини $\{B_i, i = 1, \dots, n_B\}$.

- 6) Формування (побудова) квазіоптимальних (еталонних) режимів.

Визначення, яке навантаження формує найбільшу частку «неоптимальності» роботи ЛЕС стосовно точок підключення джерел живлення.

- 7) Формування керуючих впливів.

- 8) Розробка для мешканців та користувачів будівель рекомендацій щодо зменшення енергоспоживання (кошти; вирівнювання графіків електроспоживання тощо).

Роботу гнучких навантажень будівель, як говорилося раніше, можна зміщувати в часі. Наприклад, пральні машини, сушарки для білизни, посудомийні машини, насоси для басейнів тощо можна переключати на різні періоди часу в межах бажаного робочого вікна для зниження витрат. Система енергетичного менеджменту будівель планує роботу таких гнучких навантажень у бажаному вікні роботи, визначеному споживачем [2].

Рисунок 1 демонструє взаємозв'язок між джерелами гнучкості будівель РЕР, які є в локальних системах (або є частиною активних споживачів) та енергетичного арбітражу [2].



Рис. 1. Взаємозв'язок між джерелами гнучкості будівель РЕР

кладаючи зарядку електромобілів. Споживачі також можуть скоротити своє споживання з мережі, використовуючи свої локальні фотоелектричні генеруючі або накопичувальні блоки, такі як системи накопичення енергії в системах зберігання і EV у режимі передачі енергії від електромобіля до будівлі (V2B), щоб задовольнити свої потреби в електроенергії.

З іншого боку, житлові накопичувачі, такі як системи зберігання енергії і EV батареї в режимі електромобіль-мережа (V2G), можуть забезпечити гнучкість енергетичного арбітражу в електромережі, тобто накопичувати енергію в своїх накопичувачах і подавати її назад в мережу, коли це необхідно. Навантаження кондиціонування житлових приміщень є основними джерелами гнучкості в житлових будинках, але через значну залежність від температури навколишнього середовища ці навантаження зазвичай класифікуються як спонтанні навантаження, і вони є одними з ключових факторів щоденного та сезонного пікового попиту в житловому секторі.

Зазначимо можливі стратегії змінення навантаження будівель [12-14]:

- 1) Зниження навантаження (Peak shaving). Споживачі скорочують загальне споживання електроенергії без перенесення навантаження на будь-який інший період часу.
- 2) Перенесення навантаження (Load Shifting). Споживачі аналізують графіки навантаження за допомогою агрегатора та переносять споживання електроенергії на інші години.
- 3) Гнучке змінення навантаження (Flexible Load Shape). Основна ідея, на якій заснована ця стратегія, полягає в укладенні угод між агрегатором і споживачем, щоб споживач сформував необхідні графіки електричних навантажень в обмін на фінансові стимули.
- 4) Перенесення навантаження на час доби, коли низькі ціни (Energy arbitrage – енергетичний арбітраж).

Запропоновані стратегії зниження навантаження допоможуть агрегаторам та постачальникам координувати діяльність споживачів. На практиці агрегатор може виділити конкретний клас споживачів або стратегію зниження навантаження, а не охоплювати всі варіанти змінення навантажень.

При реалізації механізмів (алгоритмів) реагування на попит оцінимо неоптимальність споживання

$$W_{nonm} = \frac{1}{T_T} \int_0^{T_T} (p_{cn}(t) - p_{onm}(t))^2 dt, \quad (1)$$

Енергетичний арбітраж – це практика купівлі електроенергії, коли ціни низькі, з подальшим її зберіганням або перепродаж, коли ціни вищі з одержанням таким чином прибутку від різниці в ціні.

Поява технології передачі енергії від автомобіля до будівлі (V2B) дає можливість експортувати електроенергію з акумулятора в електромобілі (EV) у будівлі, щоб допомогти задовольнити потреби в електроенергії. Більшість РЕР можна контролювати і дозволяти традиційно пасивним побутовим споживачам грати активну роль в енергетичному балансі енергомережі та отримувати фінансові прибутки або стимули для своїх послуг гнучкості [2].

Інтелектуальна зарядка електромобіля від мережі (G2V) також може запропонувати гнучкість зміни попиту, від-

де T_T – інтервал, $p_{onm}(t)$ – оптимальний розподіл потужностей, одержаний за методикою, розглянутою вище, $p_{cn}(t)$ – графік споживання.

Характеристика зниження неоптимальності в результаті реалізації механізмів керування попитом будівель:

$$W_{nonm.k} = \frac{1}{T_T} \int_0^{T_T} (p_{cn}(t) - p_{DSM}(t))^2 dt. \quad (2)$$

Оцінка неоптимальності вигоди на інтервалі:

$$W_{nonm.в} = \frac{1}{T_T} \int_0^{T_T} (p_{DSM}(t) - p_{onm}(t))^2 dt. \quad (3)$$

Співвідношення між виразами (1) – (3) дозволяють оцінити ефективність реалізації конкретного механізму (алгоритму) керування попитом.

Для уточнення ефективності вибору та реалізації механізмів керування представимо вирази з використанням вартості електроенергії:

$$C_{nonm} = \frac{1}{T_T} \int_0^{T_T} (p_{cn}(t) - p_{onm}(t))^2 c(t)^2 dt; \quad (4)$$

$$C_{nonm.k} = \frac{1}{T_T} \int_0^{T_T} (p_{cn}(t) - p_{DSM}(t))^2 c(t)^2 dt; \quad (5)$$

$$C_{nonm.в} = \frac{1}{T_T} \int_0^{T_T} (p_{DSM}(t) - p_{onm}(t))^2 c(t)^2 dt. \quad (6)$$

Розглянемо як приклад використання механізмів DSM для локальної системи з неінтрузивним моніторингом та з системою енергоменеджменту на основі підходів та методів ТЕ. Локальна система складається з сонячного генератора, вітрогенератора, системи зберігання енергії та гарантованого джерела живлення. За навантаження слугуватимуть житлові будівлі з добовим графіком споживання (рис. 2 а), для якого розраховано вартість електроенергії за 1 кВт·год для кожного інтервалу (рис. 2 б) (таблиця, стовпчик 1). На вартість впливає розподіл потужностей по генераторам локальної системи, вартість вироблення енергії яких відрізняється.

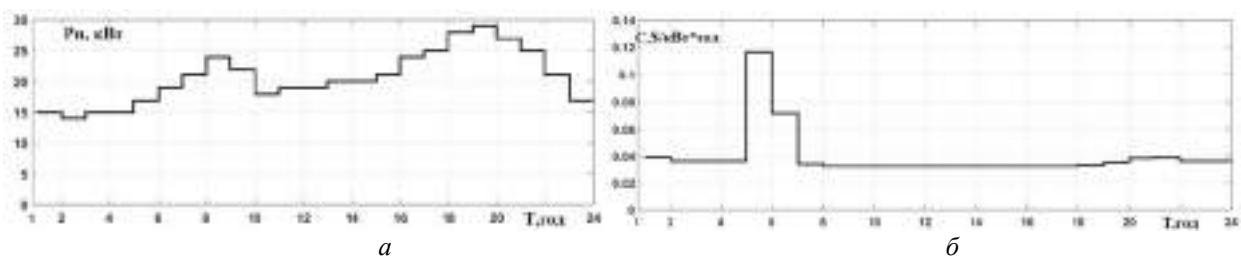


Рис. 2. Графіки добового споживання (а) та вартості (б) електроенергії

Аналізуючи графік, бачимо, що найбільша ціна за електроенергію на 5-7 інтервалах, оскільки це ранкові години, сонячна енергія майже відсутня, система зберігання розряджена, вітрової енергії недостатньо для забезпечення навантаження, тому електроенергію виробляє дизель-генератор. Середня добова вартість за 1 кВт енергії дорівнює 0,0397 \$/кВт·год.

Агрегатор згідно зі стратегією Load Shifting після проведеного аналізу пропонує споживачу оптимізувати графік навантаження шляхом перенесення потужності на інші інтервали часу, водночас середнє значення потужності залишається незмінним (таблиця, стовпчик 2). Процент змінення відносно базового графіку навантаження $C\%$ дорівнює 7,5%. Споживачі самі обирають кількість електроенергії, яку вони хочуть зменшити, виходячи із наданої їм пропозиції та економічної вигоди, яку вони отримають.

Параметри	Базовий графік	Load Shifting	Flexible Load Shape	Load Curtailment	Energy arbitrage
	1	2	3	4	5
Характеристики споживача					
$P_{min}, \text{кВт}$	14	13	13	13	10
$P_{max}, \text{кВт}$	29	29	28	29	29
$P_{сер}, \text{кВт}$	20,5	20,5	20,5	19,7	20,5
Витрати на генерацію					
$C, \$/\text{кВт}\cdot\text{год}$	0,0397	0,0367	0,0358	0,0347	0,0347
$C, \%$	-	7,5	9,8	12,5	12,5

Розглянемо варіант перерозподілу потужності згідно зі стратегією Flexible Load Shape. Розрахунки показують, що зменшились втрати відносно базового варіанту на 9,8 % (таблиця, стовпчик 3).

За умови використання стратегії Peak shaving зменшення навантаження відбулось у вечірні часи та частково у ранкові. Вартість електроенергії зменшилась на 12,5% (таблиця, стовпчик 4), водночас зменшилась середня потужність споживача.

При застосуванні стратегії Energy arbitrage, відбулось перенесення навантаження ранкових годин на денний час, де енергія найдешевша при максимальному використанні енергії сонячних генераторів, це призвело до зменшення вартості на 12,5%, але при цьому середня потужність не змінилась (таблиця, стовпчик 5).

Розглянутий приклад показує, що в локальних системах застосування сучасних програм керування попитом дозволяє отримувати фінансові вигоди.

Висновки. Системи моніторингу та системи енергоменеджменту житлових будинків та комерційних будівель є важливими елементами для ефективного використання гнучкості побутових споживачів, оскільки це сприятиме активній участі споживачів у структурі транзактивних енергетичних систем для досягнення економічної вигоди як для споживачів, так і для постачальників.

Неоптимальність відбору від генератора та споживання навантаженнями електроенергії оцінено з точки зору роботи локальної системи при живленні будівлі. Представлено методику оцінки нерівномірності процесів генерації розосереджених енергетичних ресурсів та споживання електроенергії в локальних електроенергетичних системах при вирішенні задачі балансування попиту та пропозиції.

Застосування сучасних програм керування попитом дозволяє змінювати споживчий попит на енергію за допомогою різних методів, таких як технічні (технологічні) заходи, фінансові стимули та зміна поведінки, зокрема, з використанням неінтрузивного моніторингу навантаження.

Представлені розрахунки для локальної електроенергетичної системи показали, що використання програм керування попитом дають змогу знизити вартість електроенергії за 1 кВт·год до 12,5 % залежно від обраних програм.

1. Morales-España Germán, Martínez-Gordón Rafael. Classifying and modelling demand response in power systems. *Energy*. 2022. №242. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122544>
2. Nizami Sohrab, Tushar Wayes, Hossain M.J., Yuen Chau, Saha Tapan, Poor H. Vincent. Transactive energy for low voltage residential networks: a review. *Applied Energy*. 2022. № 323. Pp. 1-19. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119556>
3. Olivares-Rojas J. C., E. Reyes-Archundia, J. A. Gutiérrez-Gnecchi, I. Molina-Moreno, J. Cerda-Jacobo and A. Méndez-Patiño, A transactive energy model for smart metering systems using blockchain. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*. 2021. № 7. Pp. 943-953. DOI: <https://doi.org/10.17775/CSEEJPES.2020.05670>
4. <https://gridwiseac.org/> (дата звернення 20.09.2024).
5. IEC TS 62898-3-4:2023 - Microgrids - Part 3-4: Technical requirements - Microgrid monitoring and control systems Released:8/25/2023

6. Кириленко О. В., Денисюк С. П., Блінов І. В. Енергетичний менеджмент: нові пріоритети XXI століття. *Енергетика: економіка, технології, екологія: науковий журнал*. 2024. № 1. С. 7-27. DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.1.2024.297508>
7. Кириленко, О., Стогній, Б., Денисюк, С. і Сопель, М. Smart-моніторинг електроенергетичних систем. *Технічна електродинаміка*. 2024. № 5. С. 048. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2024.05.048.4>
8. Чернещук І.С. Неінтрузивний моніторинг навантаження – перспективний напрямок моніторингу електроспоживання будівель. *Енергетика: економіка, технології, екологія: науковий журнал*. 2024. № 2. С. 106-118. DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.2.2024.303119>
9. Smart Buildings as a Transactive Energy Hub GWAC White Paper. URL: https://gridwiseac.org/pdfs/Smart_Buildings_as_a_Transactive_Energy_Hub_August_2020_PNNL_30103_V1.pdf (дата звернення 20.09.2024)
10. R. Chandra, S. Banerjee and S. K. Panda. Building energy management system for transactive energy framework. *IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*. Chennai, India. 2018. P. 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1109/PEDES.2018.8707803>
11. Гілевич К.М. Аналіз рівнів неоптимальності режимів електричних мереж низької напруги при нерівномірності генерації та споживання електроенергії. *Енергетика: економіка, технології, екологія : науковий журнал*. 2024. № 2. С. 14-26. DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.2.2024.303068>
12. R. Deng, Z. Yang, M. -Y. Chow and J. Chen. A Survey on Demand Response in Smart Grids: Mathematical Models and Approaches. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2015. № 11. Pp. 570-582. DOI: <https://doi.org/10.1109/TII.2015.2414719>
13. Ponds, Kody & Arefi, Ali & Sayigh, Ali & Ledwich, Gerard. Aggregator of Demand Response for Renewable Integration and Customer Engagement: Strengths, Weaknesses, Opportunities, and Threats. *Energies*. 2018. №11(9). DOI: <https://doi.org/10.3390/en11092391>
14. Белоха Г., Сичова В. Оптимізація графіків електричного навантаження агрегатором в локальних електроенергетичних системах. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2023. № 66. DOI: <https://doi.org/publishing2023.66.084>

MONITORING OF THE EFFICIENCY IN LOCAL ELECTRICITY SYSTEMS

S. Denysiuk, H. Bielokha, K. Hilevich, I. Cherneshchuk

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

Beresteisky Ave., 37, Kyiv, 03056, Ukraine

e-mail: pointage13@gmail.com

The local electricity system is a decentralized grid, one of the tasks of which is the optimized management of distributed energy resources. To achieve effective integration and interaction in the work of local systems at the level of residential and commercial buildings, a set of systems and algorithms that are combined into monitoring systems is required. A transactive energy system allows multiple interconnected buildings to exchange energy for greater energy efficiency. The article presents the peculiarities of monitoring such systems, the method of assessing the efficiency of the local system and the assessment of the unevenness of the energy consumption schedules when powering the elements of the local system. The introduction of modern programs (mechanisms) of demand side management to participate in the balancing of supply and demand is considered. The application of demand management mechanisms for a local system with non-intrusive load monitoring and an energy management system based on transactive energy approaches and methods is considered. Bibl 14, fig. 2.

Key words: non-intrusive monitoring, local electricity system, distributed energy resources, renewable energy sources.

1. Morales-España Germán, Martínez-Gordón Rafael. Classifying and modelling demand response in power systems. *Energy*. 2022. №242. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122544>
2. Nizami Sohrab, Tushar Wayes, Hossain M.J., Yuen Chau, Saha Tapan, Poor H. Vincent. Transactive energy for low voltage residential networks: a review. *Applied Energy*. 2022. №323. Pp. 1-19. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119556>
3. Olivares-Rojas J. C., E. Reyes-Archundia, J. A. Gutiérrez-Gnecchi, I. Molina-Moreno, J. Cerda-Jacobo and A. Méndez-Patiño, A transactive energy model for smart metering systems using blockchain. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*. 2021. № 7. Pp. 943-953. DOI: <https://doi.org/10.17775/CSEEJPES.2020.05670>
4. <https://gridwiseac.org/> (Accessed at 20.09.2024).
5. IEC TS 62898-3-4:2023 - Microgrids - Part 3-4: Technical requirements - Microgrid monitoring and control systems Released:8/25/2023
6. Kyrylenko, O. V. Denisyuk, S. P. Blinov, I. V. Energy management: new priorities of the 21st century. *Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohiyi, ekolohiya: naukovyy zhurnal*. 2024. №1. 1. P. 7-27. DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.1.2024.297508> (Ukr)
7. Kyrylenko, O., Stogniy, B., Denisyuk, S. and Sopel, M. Smart-monitoring of electric power systems. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2024. №. 5. P. 048. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2024.05.048.4> (Ukr)

8. Cherneshchuk I.S. Non-intrusive load monitoring – a promising direction of building electricity consumption monitoring. *Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohiyi, ekolohiya: naukovyy zhurnal*. 2024. №2. P. 106-118. DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.2.2024.303119> (Ukr)
9. Smart Buildings as a Transactive Energy Hub GWAC White Paper. URL https://gridwiseac.org/pdfs/Smart_Buildings_as_a_Transactive_Energy_Hub_August_2020_PNNL_30103_V1.pdf (Accessed at 20.09.2024)
10. R. Chandra, S. Banerjee and S. K. Panda. Building energy management system for transactive energy framework. *IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*. Chennai, India. 2018. P. 1-6, DOI: <https://doi.org/10.1109/PEDES.2018.8707803>
11. Hilevich K. M. Analysis of the levels of non-optimality of the modes of low-voltage electric networks in the case of non-uniformity of electricity generation and consumption. *Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohiyi, ekolohiya: naukovyy zhurnal*. 2024. № 2. P. 14-26. DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.2.2024.303068> (Ukr)
12. R. Deng, Z. Yang, M. -Y. Chow and J. Chen. A Survey on Demand Response in Smart Grids: Mathematical Models and Approaches. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2015. № 11. Pp. 570-582. DOI: <https://doi.org/10.1109/TII.2015.2414719>
13. Ponds, Kody & Arefi, Ali & Sayigh, Ali & Ledwich, Gerard. Aggregator of Demand Response for Renewable Integration and Customer Engagement: Strengths, Weaknesses, Opportunities, and Threats. *Energies*. 2018. №11(9) DOI: <https://doi.org/10.3390/en11092391>
14. Bielokha, H. and V. Sychova. Optimization of electric load schedules by an aggregator in local power systems. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2023. № 66. DOI: <https://doi.org/publishing2023.66.084> (Ukr)

Надійшла: 26.09.2024

Прийнята: 10.10.2024

Submitted: 26.09.2024

Accepted: 10.11.2024

УДК 21.003

ПРАКТИЧНЕ ЗНАЧЕННЯ НАЯВНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ НАУКОВО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО КОМПЛЕКСУ В СУЧАСНИХ ПРОЦЕСАХ РЕФОРМУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ГАЛУЗІ КРАЇНИ

Н.І. Дунаєвська*, докт. техн. наук, **В.Я. Євтухов****

Інститут теплоенергетичних технологій НАН України,

вул. Андріївська, 19, Київ, 04070, Україна

e-mail: dunayevskani@ukr.net, volodymyr.ceti@i.ua

Розглянуто наукове та практичне значення дослідного магнітогідродинамічного (МГД) генератора К-1 (Київ-1) у минулих фундаментальних дослідженнях у галузі енергетики. Описано особливості високотемпературних процесів МГД-перетворення, основні елементи та вузли установки К-1, структуру та спеціальне технологічне забезпечення МГД-генератора. Окреслено практичне значення та перспективність наявної інфраструктури науково-експериментального комплексу (НЕК) у процесах сучасного інноваційного реформування енергетичної галузі країни. Запропоновано стратегію використання інфраструктури НЕК як випробувального стенда, а також наукового хаба для розробок нових енергопроектів у співпраці дослідних інститутів, освітніх закладів та енергетичних компаній, зацікавлених у проведенні досліджень та вирішенні практичних задач у галузі енергетики. Бібл. 12, рис. 3.

Ключові слова: електрична енергія, електрична станція, науково-експериментальний комплекс, магнітогідродинамічний генератор, випробувальний стенд, відновлення економіки.

Енергетична й фінансова кризи, пандемія й війна – це реальність, яка останніми роками впливає не лише на економіку країни, а також на функціонування її науково-освітніх закладів. У цій історичній фазі для таких закладів важливо насамперед визначити власні сильні й слабкі сторони, урахувати перспективи, оцінити можливі ризики та адаптувати в нових умовах свою стратегію використання наявних технологічних засобів та потужностей [1].

У більшості публікацій та дискусій стосовно такого стратегічного планування наводяться рекомендації здебільшого щодо необхідності залучення інвестицій [2, 3]. Часто такі рекомендації мають надто загальний характер і не завжди впливають на перспективи розвитку, але вони можуть стати більш актуальними та ефективними у взаємодії з іншими інструментами та чинниками.

Метою цієї статті є об'єктивна оцінка технологічного потенціалу науково-експериментального комплексу академічного закладу та окреслення ефективних механізмів його використання в сучасних умовах. Приділено увагу можливостям використання колишнього магнітогідродинамічного (МГД) комплексу в дослідницькій та інноваційній діяльності в галузі енергетики.

Історія наявної інфраструктури науково-експериментального комплексу на базі першої київської теплоелектростанції (ТЕС) почалась у часи світової енергетичної кризи, у другій половині минулого сторіччя. Саме в той час наукова спільнота надавала особливу увагу методу МГД-генерації як засобу підвищення ефективності ТЕС.

Теоретичні оцінки та результати тогочасних експериментів показували, що ККД звичайної ТЕС підвищується на 10–20 % у разі використання МГД-генераторів як високотемпературної надбудови до них [4].

1 Огляд МГД – комплексу

1.1 Принцип МГД-генерування. Принцип МГД-генерування, заснований на законі електромагнітної індукції Фарадея, що лежить в основі електротехніки й електромашинобудування, дає змогу створювати системи, які можуть перетворювати види енергії в електричну енергію. Майкл Фарадей своїми дослідженнями довів, що для цієї мети придатний не лише обертальний рух у магнітному полі твердого провідника, а й рух рідкого і газоподібного провідників. МГД-генератор, у якому відсутні елементи, що обертаються, суміщає в собі

функції двох основних елементів звичайної теплової електростанції: парової турбіни і електричного генератора, але є більш простим пристроєм, ніж турбогенератор [5].

Прямокутним каналом з електродами, розміщеними попарно вздовж його осі, рухається у магнітному полі з індукцією B [Тл] іонізований, високотемпературний потік (плазма) продуктів згорання органічного палива зі швидкістю v [м/с] (рис. 1). Цей потік з температурою 2800-3000К виконує в МГД-генераторах подвійну роль: термодинамічного робочого тіла (теплова машина) і електричного провідника (електрогенератор).

Під час руху плазми з електропровідністю σ [См/м] у кожній точці каналу виникає локальна електрорушійна сила (ЕРС) (індуковане поле) $v \times B$ [В/м], а на електродах, розташованих на відстані h один від одного, – ЕРС величиною $v \times B \times h$. Між парами електродів – анодом із потенціалом ϕ_a та катодом із потенціалом ϕ_k – виникає різниця потенціалів, а у плазмі – електричне поле $E \approx \frac{U}{h}$ [В/м], направле-
не проти індукованого поля $v \times B$.

У разі підключення електродів МГД-генератора до навантаження (зовнішня мережа) в електропровідному середовищі плазми з'явиться струм густиною i [А/м²], а в ланцюгу – повний струм $I = j \times a \times L$, де a – ширина електродів у каналі в напрямку B , L – їхня довжина [5, 6].

1.2 Коротка історія створення високотемпературних МГД-установок. Перша дослідна МГД-установка була випробувана в США у 1959 році, а справжній пік досліджень процесів перетворення високотемпературної теплової енергії в електричну припав на 1970-1980 роки. Для проведення експериментальних досліджень у багатьох розвинених країнах були створені науково-дослідні центри.

Основні переваги МГД-генераторів як-от можливість використання високої температури робочого тіла як початкової у повному термодинамічному циклі, відсутність рухомих вузлів (мас), безконтактна взаємодія плазми з магнітним полем, простота конструкції та керування тощо [6] сприяли тому, що на території першої київської теплової електростанції наприкінці 60-х років минулого століття виник науково-технічний центр (технологічний дослідницький хаб сучасною термінологією).

Для створення інфраструктури науково-експериментального комплексу були залучені фахівці проектних, будівельних та монтажних організацій, а для досліджень високотемпературних процесів і новітніх магнітних технологій – сотні науковців з-понад десятка академічних установ, зокрема двох провідних – Інституту електродинаміки (ІЕД) та Інституту газу (ІГ) – фундаторів цих досліджень в Україні. На території було розміщено низку експериментальних установок, стендів, лабораторій, серед яких головний стенд – дослідна експериментальна МГД-установка К-1 (Київ-1) проектною електричною потужністю 200 кВт, час створення якої фактично започаткував історію сучасного Інституту теплоенергетичних технологій (ІТЕТ) НАН України. Установка К-1 із комплексом допоміжного високотехнологічного обладнання протягом наступних 20 років була однією з трьох базових установок за Національною програмою Радянського Союзу з МГД-перетворення енергії [4, 7].

До 1990 р. загальна електрична потужність дослідних енергетичних МГД-генераторів на продуктах згорання досягла 21 МВт із тривалістю безперервної роботи до 1000 годин та ККД – до 16 %. Були розроблені проекти промислових МГД-електростанцій на природному газі потужністю 500 МВт з часткою МГДГ 200 МВт [7].

Дослідження процесів перетворення енергії на МГД-установці К-1 тривало протягом 30 років, до початку 90-х років, коли 23.06.1993 відбувся останній 171-й експериментальний

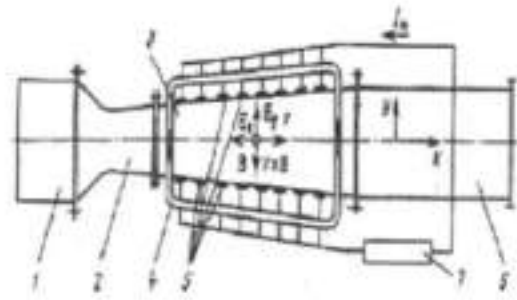


Рис. 1. Схема фарадівського МГД-генератора [6], де позначено: 1– джерело енергії, 2–сопло, 3– МГД-канал, 4–електромагніт, 5–електроди, 6–дифузор

пуск К-1, присвячений насамперед, як і попередні декілька пусків, екологічним питанням, зокрема вивченню впливу вологи на утворення оксидів азоту в високотемпературних продуктах згоряння палива [7].

1.3. Склад МГД-установки К-1 та характеристики її основних вузлів. Унікальність установки К-1 як самостійного перетворювача теплової енергії в електричну полягала в потужному, комплексному енерготехнологічному забезпеченні, що за незалежними оцінками не мало рівних у світі серед подібних МГД-установок, та в наявності замикального паротурбінного циклу. Робочою речовиною установки слугувала плазма продуктів згоряння природного газу в атмосфері стисненого повітря, збагаченого киснем (до 50 %), за максимальної витрати до 3 кг/с, а магнітна система (колишня секція синхрофазотрону) забезпечувала індукцію магнітного поля до 2 Тл [4] (рис. 2).



Рис. 2. Експериментальна МГД-установка К-1 електричною потужністю 200 кВт (фото 90-х років минулого століття) [4]

Сам принцип МГД-перетворення енергії, а також термодинамічна, функціональна, структурна й електрична схеми визначили розміри установки і розташування її основних елементів, а саме камери згоряння (джерело енергії) із соплом (розгінний пристрій), МГД-каналу (генератор електроенергії) із дифузorzом (вихлопний пристрій), магнітної системи.

Камера згоряння з соплом. Ефективна робота камери згоряння (КЗ) насамперед залежить від температури горіння та геометричних параметрів камери. Тривала експлуатація камери згоряння установки К-1 (теплова потужність 17,5 МВт, температура горіння до 3200 К, сумарна витрата продуктів згоряння до 3,0 кг/с) показала, що її конструкція є надійною, має високі пускові якості та низький рівень пульсації горіння.

Розгінний пристрій (сопло), що призначений для формування структури плазмового, близького до звукового, газодинамічного потоку, забезпечує його сталість у каналі, а також визначає характеристики і процеси МГД-генератора, а саме тертя, тепловіддачу, приелектродне падіння напруги, ресурс вогневих стінок тощо.

Канал з дифузorzом. Залежно від призначення та режиму роботи МГД-генератора конструкції каналів якісно відрізняються. Для енергетичних МГД генераторів застосовується фарадеївський канал прямокутної форми, з секційними електродами, розташованими на стінках каналу. До матеріалів вогневих стінок МГД-каналу, облицьованих спеціальною керамікою, які зазнають впливів, характерних також і для ракетної техніки, висуваються також вимоги щодо їхніх електропровідних та електроізоляційних властивостей.

Експериментальні водоохолоджувальні канали установки К-1 із перерізом 250×100мм мали довжину 5 м. Водоохолоджувальний фальш-канал (аеродинамічна труба), призначений для відпрацювання режимних параметрів установки, має довжину 5 м, переріз на вході 250×100мм, на виході – 400×100 мм.

Для зниження швидкості продуктів згоряння та тиску у вихлопному тракті каналу МГД-генератора застосовується високоефективний дифузор.

Магнітна система (МС) МГД-генератора. Магнітна система призначена для створення магнітної індукції B та її розподілення у робочому об'ємі каналу. Відомо, що щільність електричної потужності й параметри МГД-взаємодії в каналі пропорційні B^2 , тому МС повинна забезпечувати високі значення індукції. Власне МС загалом визначає енергетичні, масові та габаритні характеристики самої МГД-установки.

Магнітна система установки К-1 із індукцією 2 Тл мала загальну вагу 100 т.

1.4. МГД-дослідження як приклад ефекту синергії у реалізації науково-технічного проекту та його значення

Модернізацію старої теплової електростанції (нині індустриальна пам'ятка XIX сторіччя [8]) слід оцінювати в масштабах розвитку електроенергетики другої половини XX сторіччя, коли понад 90 % електроенергії у світі вироблялося на теплових електростанціях, ККД яких практично не перевищував 40 %. Тому на той час серед різних методів підвищення економічності традиційних електростанцій привабливим та перспективним видався магнітогідродинамічний метод генерування енергії, запровадження якого давало б можливість, суттєво зменшивши вплив шкідливих викидів на довкілля, підняти ККД ТЕС до 55–60 % [5].

Створення інфраструктури науково-експериментального комплексу на базі установки К-1 є прикладом ефективної співпраці наукових фахівців. Результати багаторічних досліджень показали, що отримані знання щодо високотемпературних процесів магнітної гідродинаміки якісно коректні, і підтвердили принципову можливість застосування магнітогідродинамічного методу генерування електричної енергії [7].

Початок впровадження в енергетику бінарних парогазових ТЕС, ККД яких досягав 58 %, а також виявлені технологічні недоліки МГД-генераторів, які вимагали великих капіталовкладень, призвели до згорання досліджень із цієї тематики.

Подальші перспективи застосування МГД-перетворювачів енергії залежатимуть від їхньої конкурентоспроможності та функціональних можливостей, які можуть покращуватися й розширюватися відповідно до розвитку плазових, електромагнітних та високотемпературних технологій, а характеристики традиційних енергетичних установок будуть наближатися до своїх граничних значень [7].

2. Сучасний стан

ІТЕТ НАНУ має унікальну, розвинену, енергетично-забезпечену експериментальну базу з низкою дослідних стендів й установок, на яких у різні часи проводилися дослідження, пов'язані з вирішенням енергетичних та екологічних проблем теплоенергетики. Діяльність Інституту теплоенергетичних технологій НАН України в умовах нових викликів продовжується в напрямку проведення фундаментальних і прикладних досліджень, а саме процесів горіння та теплофізичних властивостей продуктів згоряння твердих палив, методів уловлення викидів шкідливих та парникових газів, технологій водневої та амонійної енергетики тощо із впровадженням отриманих результатів на об'єктах енергетики [9].

2.1. Склад наявної інфраструктури науково-експериментального комплексу К-1.

Після припинення досліджень високотемпературних процесів МГД-перетворень більшість стендів та установок, пов'язаних із цією тематикою, були законсервовані або демонтовані. Утім, розгалужений технологічний комплекс, що забезпечував проведення досліджень, загалом знаходиться в робочому стані або "гарячому" резерві (рис. 3).

До складу технологічного комплексу належать:

- газопостачальна система у складі газорозподільного пункту (ГРП), який отримує магістральний природний газ із тиском 0,3 МПа та може забезпечувати із тиском газу 0,06 МПа максимальну його витрату до 6300 м³/год, та газової компресорної (два компресора 205 ГП 30/8 продуктивністю 30 м³/хв із тиском газу 0,8 МПа);

- система забезпечення стисненим повітрям: турбокомпресор К-500 продуктивністю $520 \text{ нм}^3/\text{хв}$ із тиском $0,8 \text{ МПа}$ та двох компресорів – поршневого ПКС-3.5 та гвинтового SCR- 30М із аналогічними параметрами (продуктивність – $3,5 \text{ нм}^3/\text{хв}$, тиск – $0,8 \text{ МПа}$), а також поршневого 305 ВП 30/8 продуктивністю $30 \text{ нм}^3/\text{хв}$ із тиском $0,8 \text{ МПа}$;

- система забезпечення киснем у складі 32 балонів реципієнта по 400 л кожний із тиском кисню $14,0 \text{ МПа}$ та з установками газифікації та регулювання;

- система охолодження технічною водою з річки Дніпро, на березі якої розміщена берегова насосна станція (БНС) – 4 відцентрових електронасоси типу 400Д (із продуктивністю $1860 \text{ нм}^3/\text{год}$ та тиском 15 м.в.ст. кожний), які забезпечують охолодження тракту відпрацьованих газів МГД-генератора, теплообмінників турбокомпресора та поршневих компресорів тощо;

- система охолодження хімічно-очищеною водою (ХОВ), яка забезпечувала працездатність обладнання головного стенда МГДГ та інших дослідних стендів. Складається з іонообмінних фільтрів, баків, електронасосів тощо.

- система електропостачання (разом із високовольтною частиною) – комплекс споруд, електрообладнання, регулювальної й захисної апаратури, які повністю забезпечують роботу всього устаткування НЕК та загалом функціонування самого Інституту.

2.2. Експериментальні стенди та дослідні установки ІТЕТ. Наразі більшість великих стендів та установок включно з МГД-установкою К-1 перебувають у стані тривалої консервації. Проте окремі знаходяться в робочому стані та періодичній експлуатації. Серед них установка високотемпературної газифікації у потоці твердого палива з витратою 100 кг/год (ВГП-100); стенд фізико-технічних досліджень (СФТД); високотемпературна газова піч (ГП) та деякі інші.

2.2.1. Установка ВГП-100. Установка ВГП-100, призначена для проведення комплексних, масштабних дослідів із вивчення проблем ефективного спалювання різних видів палив, перебуває у робочому стані, обладнана діагностичним вимірювальним комплексом, системами енергозабезпечення та захисту.

Теплофізичні характеристики та потенціал енергозабезпечення установки, яка не має аналогів в Україні, дають змогу проводити комплексні, масштабні досліді з вивчення проблем ефективного спалювання різних видів палива.

Установка складається з камери згоряння та вертикального, футерованого, водоохолоджувального реактора. Камера згоряння – футерований водо-охолоджувальний циліндр із внутрішнім діаметром 200 мм , довжиною 500 мм . Реактор – водоохолоджувальний вертикальний циліндр, який складається з 7 секцій, футерованих двоокисом цирконію, із внутрішнім діаметром 200 мм , висотою 600 мм кожна. Верхні дві секції служать діагностичними ділянками реактора.

Проектні теплофізичні характеристики реактора: температура продуктів згоряння – 2300 К , теплова потужність реактора – 300 кВт , питомий тепловий потік – $11,7 \text{ кВт/м}^2$, тепловтрати крізь футеровку – $30,7 \text{ кВт}$.



Рис. 3. Вигляд МГД-установки К-1 (на передньому плані – фальш-канал з трактом продуктів згоряння, на задньому – відцентровий повітряний компресор К-500)

Тривала експлуатація установки потребує удосконалення вимірювального комплексу та ремонту футерівки реактора.

2.2.2. Стенд фізико-технічних досліджень (СФТД). СФТД, створений науковцями Інституту електродинаміки НАНУ, призначений для проведення експериментальних досліджень робочого тіла МГД-генератора, фізичних досліджень електродних та ізоляційних конструкцій і матеріалів МГД-канала, а також для відпрацювання діагностичної апаратури. Стенд розміщений у трьох герметичних боксах: випробувальний, щит керування, оптична лабораторія та має повне енергозабезпечення. У випробувальному боксі розташовані дві модульні експериментальні установки з витратою продуктів згоряння до 300 г/с кожна.

2.2.3. Високотемпературна газова піч. Газова піч, створена за проектом Інституту матеріалознавства НАНУ, призначена для обпалювання вогнетривких матеріалів та мозаїчної кераміки з високими фізико-механічними властивостями, які використовувалися для футерівки каналу МГД-генератора. Максимальна температура обпалювання 1700°C. Тривалість обпалювання 50-60 годин. Робочий тиск газу $0,025 \pm 0,06$ МПа. Повітря для горіння подається вентилятором високого тиску ВВД-8 (ПУ-2). Номінальні витрати газу на пальник – 4 м³/год. Максимальні витрати газу на пальник – $6,0 \pm 1,0$ м³/год.

3. Перспективні рекомендації.

Енергетична галузь країни в умовах необхідності безпрецедентної мобілізації економічних, соціальних та технологічних ресурсів потребує перегляду старих стереотипів та впровадження нових адаптивних підходів до її реформування [9].

Для відповідності вимогам часу будь які заклади та організації потребують модернізації. Базовий крок цього процесу – перегляд (оновлення) стратегії діяльності. Для порівняння наведемо принципи переходу до енергетичного оновлення, розробленого Cambridge Centre for Environment, Energy and Natural Resource Governance (C-EENRG), а саме націлювання на переломні точки, поєднання політики, адаптивність використання можливості, вибір ефективних технологій, забезпечення справедливих відкритих умов, регулювання та інвестування, зменшення ризиків, урахування похибки оціночних чинників [10].

Необхідною передумовою стратегічного оновлення ІТЕТ є наявність експериментальної бази та відповідно організованого й устаткованого фізичного простору. НЕК, що відповідає цим умовам, може використовуватися як науково-дослідний хаб за участю профільних інститутів, освітніх закладів й енергетичних компаній; для комерційних інноваційних стартапів із наданням випробувальних стендів у користування колективам та групам дослідників на визначених умовах; для реалізації інноваційних проєктів із використання альтернативних видів енергії: енергії біомаси, сонячної, термальної тощо.

На підготовчому етапі стратегії оновлення ІТЕТ для залучення інвестицій необхідно провести аудит усієї інфраструктури НЕК, завдяки якому можуть бути зведені до мінімуму можливі фінансові ризики.

3.1. Використання високотемпературних випробувальних стендів. Зацікавленість установкою К-1 виникала в 1995-1996 роках для використання її як випробувального стенда камер згоряння реактивних двигунів для підприємств Мотор-Січ (м. Запоріжжя) та Машпроєкт (м. Миколаїв), але за браком фінансування проєкт не був реалізований [4]. Комплекс обладнання установки К-1, що знаходиться на сьогодні у стані консервації відповідає структурі випробувальних стендів. (див. А. Трушковська “Маловідомий проєкт потужного ракетного двигуна «Монстра» М-1”. Alpha Centauri. 2023. URL: <https://thealphacentauri.net/132522-monstr-m1-dvygun/>).

Для забезпечення ефективної експлуатації, економічної конкурентоспроможності та обмеженого впливу на довкілля випробувальні стенди повинні задовольняти такі критерії, виконання яких потребує певних вимог до структури та принципової схеми стенда. Основними критеріями функціонування як випробувального, так й експериментального устаткування (єдиної бази забезпечення результативних досліджень) є універсальність, надійність і систематичність використання; діапазон можливостей в прогнозованій перспективі; розумність із міркувань матеріальних і фінансових витрат, а також віддача.

Усім цим вимогам та критеріям відповідає науково-експериментальний комплекс ІТЕТ, призначений для дослідження теплофізичних й аеродинамічних процесів в енерготехнологічних установках.

Наприклад, випробування камер згоряння та окремих вузлів ракетних двигуна на автономних стендах є ефективним засобом відпрацювання нових технічних рішень і дає змогу скоротити обсяг, вартість і загальні терміни робіт зі створення нових ГТД, а досвід створення сучасних двигунів свідчить про те, що велика частина експериментальних та довідних робіт переноситься на повузлові випробування на випробувальних стендах. (див. "Іван Губа про вогневі випробувальні стенди". "Спейс-Інформ". 2020. URL: <https://space.com.ua/2020/08/21/ivan-guba-pro-vognevi-viprobuvalni-stendi/>).

Сучасні випробувальні стенди зазвичай стенди відкритого типу, у процесі спорудження яких використовуються лише металоконструкції. Наявні масштабні експериментальні установки та енергетичні випробувальні стенди закритого типу являють собою складні технологічні комплекси. У світі дуже мало країн, які можуть дозволити собі побудувати стенди закритого типу. Для цього потрібні тривалий час та значний фінансовий ресурс.

3.2. Використання потенціалу НЕК у науково-освітніх програмах. Одна із форм навчальної роботи в закладах освіти, що розкриває інтелектуальний потенціал молоді, повинна бути орієнтована також на середовище, де майбутні фахівці могли б отримувати не лише теоретичні знання, а й набувати професійних навичок і формувати свою дослідницьку компетентність. Високотехнологічне енергозабезпечення НЕК, описане у статті, надалі може стати важливою складовою не лише спільних досліджень з розв'язання проблем традиційної та відновлюваної енергетики, а також для підготовки майбутніх фахівців-енергетиків широкого профілю.

В енергетиці незалежної України тривалий період часу не відбувалося аналізу як технологічних, так і соціально-економічних показників. Відомо, що протягом останніх років занепад української енергетики супроводжувався зниженням якості підготовки фахівців для цієї галузі, а російське повномасштабне вторгнення лише загостило цю проблему. Практично всі сектори енергетичного комплексу включно з професійною освітою не відповідають критеріям національної енергетичної безпеки [12], тому підготовці досвідчених фахівців-енергетиків необхідна бути також приділена особлива увага.

Науково-експериментальний комплекс Інституту теплоенергетичних технологій, на якому зосереджено практично все традиційне (та частково альтернативне) енергетичне устаткування, може слугувати майданчиком для підготовки майбутніх фахівців-енергетиків широкого профілю. У співпраці з навчальними закладами може бути створена комплексна лабораторія професійної освіти студентів з вивчення робочих процесів експлуатації, методів монтажу та ремонту енергетичного обладнання. Планування та стан приміщень ІТЕТ дають змогу з урахуванням вимог технологічної безпеки реалізувати найрізноманітніші потреби для професійного навчання. Наприклад, ІТЕТ розташований поблизу русла річки Дніпро – низькопотенціального джерела енергії для теплових насосів. Це може дати змогу регулярно проводити дослідження з їхнім використанням в будівлях і спорудах, розташованих поблизу річок.

Висновки. Автори статті надали фрагмент історії розвитку енергетичної галузі в середині ХХ-століття. На прикладі виконання енергетичного проекту під назвою "Дослідний магнітогідродинамічний (МГД) генератор К-1 (Київ-1)" показано, що успішна реалізація великих проектів можлива за умов поєднання практичного та наукового інтересу. Дослідження, проведені на установці К-1, зайняли гідне місце в історії енергетики та довели принципову можливість практичної реалізації МГД-методу перетворення енергії.

Можливості подальшого використання науково-експериментального комплексу є актуальними з огляду на загальнонаціональне завдання відновлення та модернізації енергетичної інфраструктури. Цей унікальний науково-експериментальний комплекс є придатним до

модернізації, а приміщення, в яких він розташовується, – до реновації відповідно до потреб дослідників. Створення енергетичного науково-дослідного хаба на базі НЕК є економічно вигіднішим, ніж побудова відповідного об'єкта “з нуля”.

При реформуванні енергетичної галузі України науковий та технологічний потенціал наявної інфраструктури ІТЕТ та НЕКу зокрема є оптимально придатним для створення хаба із проведення досліджень, розробок нових енергопроектів та реалізації нових технічних рішень у галузі енергетики.

У процесі підготовки статті було використано окремі архівні документи ІТЕТ НАН України, що не публікувалися раніше.

1. Роль і місце української енергетики у світових енергетичних процесах. Центр Разумкова. Київ, 2018. 87 с. URL: https://razumkov.org.ua/uploads/article/2018_ENERGY_PRINT.pdf (дата звернення 16.09.2024).
2. Рибчук А.В., Процишин О.Р., Лапчук Я.С., Зінкевич В.І. Функціональна спрямованість інтегрованого інструментарію економічного механізму підвищення енергоефективності національної економіки. *Business Inform.* № 545. С. 49–56.
3. Захаров В.С. Зарубіжний досвід та механізми фінансування розвитку енергетики. *Економіка та держава*. 2017. № 3. С. 93–96.
4. Дунаєвська Н.І., Євтухов В.Я. Історія енергетики м. Києва: 125 років Центральній електричній станції. *Технічна електродинаміка*. 2023. № 5. С. 82–90.
5. Магнито-гидродинамическое преобразование энергии. Москва: Наука, 1979. 584 с.
6. Магнито-гидродинамический метод преобразования энергии. Москва: Физматгиз. 1973. 536 с.
7. Ганефельд Р. В. К 50-летию исследований по МГД-преобразованию видов энергии в Национальной академии наук Украины. *Технічна електродинаміка*. 2007. № 2. С. 68–80.
8. Ієвлева В. Пам'ятки індустріального розвитку Києва кінця XIX - першої третини XX століття. Київ: Видавничий дім Прес-КІТ, 2008. 251 с.
9. Дунаєвська Н.І., Чернявський М.В., Топал О.І., Макаруч В.М., Голенко І.Л. Інститут вугільних енерготехнологій. Історія та сьогодення. Київ: Люта справа, 2018. 120 с.
10. Проект Плану відновлення України. Матеріали робочої групи "Енергетична безпека". Національна рада з відновлення України від наслідків війни, 2022. URL: <https://www.kmu.gov.ua/storage/app/sites/1/recoveryrada/ua/energy-security.pdf> (дата звернення 16.09.2024).
11. Десять принципів формування політик енергетичного переходу. Звіт робочої групи проекту "Економіка енергетичних інновацій та системного переходу". Веб-сайт Кембриджського Університету, 2022. URL: <https://eeist.co.uk/download/932/> (дата звернення 16.09.2024).
12. Євтухов В., Дунаєвська Н., Бондзик Д., Євтухов Д., Галінський О. Резерви підвищення ефективності ТЕС: зовнішнє включене енергообстеження. *Політика Енергетична (Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal)* 2023. № 26(1). С. 59–76.

THE PRACTICAL SIGNIFICANCE OF THE EXISTING INFRASTRUCTURE OF THE SCIENTIFIC AND EXPERIMENTAL COMPLEX IN MODERN PROCESSES OF REFORMING THE ENERGY INDUSTRY OF UKRAINE

N.I. Dunayevska, V.Ya. Yevtukhov

Thermal Energy Technology Institute of NAS of Ukraine,
Andriivska Str., 19, Kyiv, Ukraine, 04070
e-mail: dunayevskani@ukr.net, volodymyr.ceti@i.ua

This article reviews scientific and practical role and context of experimental magnetic-hydrodynamic (MHD) generator K-1 (Kyiv-1) in its past fundamental power research causes. Here we describe: hi-temperature MHD conversion features; basic elements and intersections of K-1 unit; structure and special technological supplies of MHD generator. We assume contemporary actuality, perspective and practical value of MHD K-1 scientific research facility infrastructure which is currently available for purposes of innovative reforming of Ukrainian energy production. Strategy to make use of facility infrastructure is proposed: in a form of scientific hub for new energy projects development in cooperation of research, educational and commercial entities interested in research and practical solutions in the energy domain. Ref. 12, fig. 3.

Keywords: electric energy, electric power station, scientific experimental facility, magnetic-hydrodynamic generator, trial stand, economic recovery.

1. The role and place of Ukraine's Energy Sector In Global Energy Processes. Razumkov Centre. Kyiv, 2018. 90p. URL: https://razumkov.org.ua/uploads/article/2018_ENERGY_PRINT.pdf (access date: 16.09.2024)
2. Rybchuk A. V., Protsyshyn O. R., Lapchuk Ya. S., Zinkevych V. I. The Functional Orientation of the Integrated Instrumentarium of the Economic Mechanism for Increasing the Energy Efficiency of the National Economy. *Business Inform*, 2023. Vol. 545. Pp. 49–56. (Ukr)
3. Zakharov V. International Experience and Financing Mechanisms of Energy Sector. *Ekonomika ta derzhava*. 2016. Vol. 3. Pp. 93–96. (Ukr)
4. Dunayevska N., Yevtukhov V. History of Energy Industry In Kyiv. 125 Years Of Central Electric Station. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2023. No 5. Pp. 82–90. (Ukr)
5. Magneto-hydrodynamic energy conversion. Moscow: Nauka, 1979. 583 p. (Rus)
6. Magnetohydrodynamic method of energy conversion. Moscow: Fizmatgiz, 1973. 536 p. (Rus)
7. Ganefeld R.V. For 50 years of researches of magnet-hydrodynamic conversion of energy types in National Academy of Sciences of Ukraine. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2007. Vol. 2. Pp. 68–80. (Rus)
8. Ievleva V. Landmarks of the industrial development of Kyiv at the end of the 19th - the first third of the 20th century. Kyiv: Press-KIT Publishing House, 2008. 248 p. (Ukr)
9. Dunaevska N.I., Chernyavskiy M.V., Topal O.I., Makarchuk V.M., Golenko I.L. Institute of coal energy technologies. History and the present. Kyiv: Lyuta Sprava, 2018. 120 p. (Ukr)
10. Project of the Recovery Plan of Ukraine: Materials of the Energy Security working group. Kyiv: National Council for the Recovery of Ukraine from the Consequences of the War, 2022. URL: <https://www.kmu.gov.ua/storage/app/sites/1/recoveryrada/ua/energy-security.pdf> (request date 16.09.2024). (Ukr)
11. Ten Principles for Policy Making in the Energy Transition: Project Economics of Energy Innovation System Transition (report). University of Cambridge. URL: <https://eeist.co.uk/download/932/> (access date 16.09.2024)
12. Yevtukhov V., Dunaievskaya N., Bondzyk D., Yevtukhov D., Halinskyi O. Reserves for improving the efficiency of thermal power stations: external on-site energy examination. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal*. 2023. Vol. 26(1). Pp. 59–76. (Ukr)

Надійшла: 08.10.2024

Прийнята: 13.11.2024

Submitted: 08.10.2024

Accepted: 13.11.2024

ТЕОРЕТИЧНА ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОФІЗИКА

УДК 621.315.2:004.94

ЕЛЕКТРИЧНЕ ПОЛЕ У ЗШИТО-ПОЛІЕТИЛЕНОВІЙ КАБЕЛЬНІЙ ІЗОЛЯЦІЇ З ЕКСЦЕНТРИЧНІСТЮ ТА ДЕФЕКТОМ НАПІВПРОВІДНОГО ЕКРАНА

І.М. Кучерява, докт. техн. наук
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна
e-mail: rB.irinan@gmail.com

За допомогою комп'ютерного моделювання проведено дослідження двовимірного електричного поля у зшито-поліетиленовій ізоляції з ексцентриситетом та виступом ізоляції у внутрішній напівпровідний екран високовольтного кабелю. Проаналізовано нерівномірність розподілу та закономірності змінення рівня електричного поля залежно від розглянутих дефектів. Представлено залежності максимального поля від значення концентриситету (у діапазоні 0–0,5) ізоляції. За результатами чисельного дослідження обґрунтовано необхідність унеможливлення ексцентриситету ізоляційної системи та її дефектів у технологічному процесі виготовлення силових кабелів для забезпечення їхньої високої якості та надійного функціонування надалі. Бібл. 15, рис. 6.

Ключові слова: високовольтний кабель, зшито-поліетиленова (ЗПЕ) ізоляція, ексцентриситет ізоляції, виступ ізоляції, напівпровідні екрани, електричне поле, комп'ютерне моделювання.

Вступ. У всьому світі стрімко зростає попит на електроенергію, що призводить до більшого її виробництва та передачі, а отже, і до збільшення потреби у високовольтних кабелях. Розвиток електроенергетичної галузі супроводжується вдосконаленням кабельної техніки, зокрема силових кабелів на високу й надвисоку напругу, що використовуються для передачі та розподілу електроенергії в енергетичних системах та відіграють важливу роль в енергетиці, промисловості та житті людей.

У 2023 році розмір світового ринку високовольтних кабелів оцінювався в 18,43 млрд. доларів США. Очікується, що в 2032 році він досягне 31,66 млрд. доларів, зростаючи щорічно на 6,2 % у період 2024–2032 рр. [1].

В енергетичних системах внаслідок значної ролі всіх складових підвищується актуальність їхньої надійності, безпечності, тривалості терміну служби. Усі складові, зокрема силові кабелі, повинні мати високу якість і надійність, щоб забезпечити безперервне енергопостачання. Це означає, що кабелі повинні бути розроблені, виготовлені та тестовані за певними критеріями.

Сучасні силові кабелі з ізоляцією зі зшитого поліетилену (ЗПЕ) мають у своєму складі центральний провідник – струмопровідну жилу, внутрішній напівпровідний екрануючий шар, основну поліетиленову ізоляцію та зовнішній напівпровідний екран. У процесі виробництва всі шари ізоляції накладаються одночасно методом потрійної екструзії.

Надійність кабелю забезпечується якістю виготовлення ізоляційної тришарової системи, використаними матеріалами, контролем відцентрованості (концентрич-

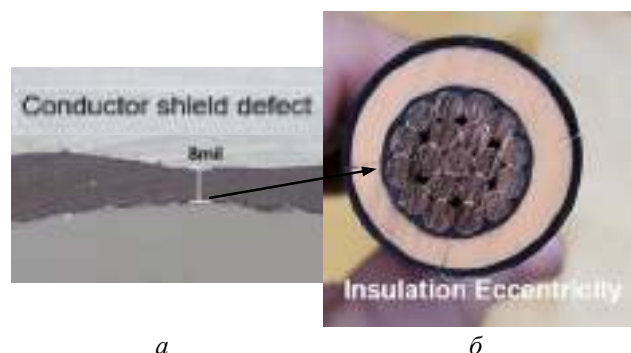


Рис. 1. Нерівномірність товщини напівпровідного екрана по жилі (а) та ексцентриситет ізоляції силового кабелю (б) [2].

ності) усіх ізоляційних шарів, округлістю їхньої поверхні (без нерівностей, виступів, пустот). До прикладу, нерівномірність у вигляді локального зменшення товщини напівпровідного екрана по жилі та відхилення від центру ізоляційних шарів ЗПЕ ізоляції показано на рис. 1 а, б [2], відповідно. Округлість і прямолінійність (за довжиною) конструкційних елементів впливають на витрати ізоляційного матеріалу та розподіл електричного поля в кабелі.

Важливим фактором, що пов'язаний з якістю кабелю, є ексцентриситет. Ексцентриситет ізоляції означає нерівномірну її товщину навколо жили (рис. 1 б [2]). Ексцентриситет впливає на електричні характеристики, може призводити до руйнування ізоляційного матеріалу, короткого замикання, аварійних ситуацій і врешті-решт до економічних втрат. Тому для забезпечення якості силового кабелю необхідно точно витримувати геометричні характеристики кабеля.

Вимірювання електричних, термічних, механічних характеристик і геометричних розмірів у поперечному перерізі включені у випробування силових кабелів [3–5]. Порушення геометричних розмірів призводить до втрати електричних і механічних властивостей та характеристик, а точне забезпечення розмірів має велике значення для унеможливлення дефектів кабелів.

Вимірювання геометричних розмірів силових кабелів включає діаметр, товщину ізоляційних шарів і ексцентриситет ізоляції в поперечному перерізі, що є важливими елементами виготовлення та випробування кабелів. У загальному випадку на ексцентриситет ізоляції впливають технічні фактори, а саме характеристики технологічної лінії виготовлення кабелів, зокрема робоча температура та швидкість поперечної лінії, а також рівень кваліфікації операторів.

Вимірювання концентричності ізоляційної системи важливо для гарантії симетричного розподілу ізоляції кабеля навколо провідника. В ідеалі концентричність має бути 100 %, проте в реальних умовах може коливатися в межах 70–90 %. Чим вище значення, тим краще та якісніше кабель. Відповідно до стандарту IEC 60840 (розділ 10.6.2) [5, 6] концентричність визначається за максимальною ($T_{\max}$) і мінімальною ($T_{\min}$) товщиною ізоляції в кожному поперечному перерізі кабеля за формулою

$$(T_{\max} - T_{\min}) / T_{\max} \quad (1)$$

і не повинна перевищувати граничного значення 0,15 (15 %).

На рис. 2 показано зміння товщини ізоляції (ліворуч) та її концентричності (праворуч) на довжині 0,8 м високовольтного кабеля, отримані в процесі виробництва за допомогою ультразвукового методу вимірювання в роботі [7]. Технологіями виробництва різних силових кабелів передбачений також моніторинг у режимі реального часу товщини та ексцентриситету ізоляційних шарів лазерними засобами [8, 9], випробуванням вихровими струмами [10], автоматичними оптичними методами [11, 12] та ін.

Метою цього дослідження є аналіз електричного поля високовольтного кабеля з ексцентриситетом ЗПЕ ізоляції й нерівномірною товщиною напівпровідного екрана по жилі, зокрема порівняння цих дефектів, як ризиків підвищення напруженості електричного поля і зменшення електричної міцності ізоляційного матеріалу.

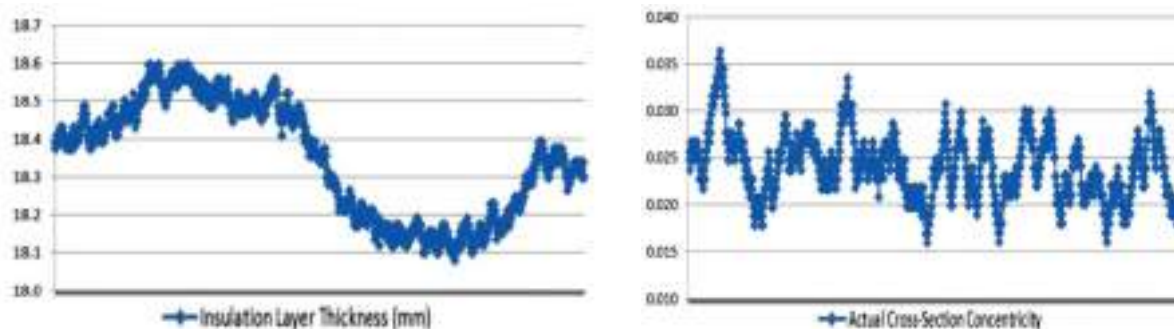


Рис. 2. Зміння товщини ізоляції (ліворуч) та її концентричності (праворуч) у процесі виробництва високовольтного кабеля [7].

Дослідження проводиться за допомогою двовимірного чисельного моделювання методом скінченних елементів у програмі Comsol [13] для силового кабеля 110 кВ.

Детальне вивчення тривимірного електричного поля в ЗПЕ ізоляції з різними структурними дефектами напівпровіддного екрана виконано в статті [14].

Модель для дослідження. Моделюються електричні процеси в поперечному перерізі кабеля. Математична модель у квазіелектростатичному наближенні ґрунтується на таких рівняннях для визначення комплексної величини скалярного електричного потенціалу ϕ :

$$\nabla \cdot \mathbf{J}_{tot} = 0 \quad \nabla \cdot (\sigma + j\omega\epsilon_0\epsilon_r)\nabla\phi = 0,$$

$$\text{де } \mathbf{J}_{tot} = (\sigma + j\omega\epsilon_0\epsilon_r)\mathbf{\dot{E}}, \quad \mathbf{\dot{E}} = -\nabla\phi,$$

де $\mathbf{J}_{tot}$ – густина повного електричного струму (струму провідності та струму зміщення), ϵ_0 та ϵ_r – електрична стала та відносна діелектрична проникність середовища (різних шарів ізоляції); σ – електропровідність відповідного середовища; $\omega = 314$ рад/с – кругова частота (встановлена частота – 50 Гц).

Основні граничні умови електричної задачі складаються з умови нульового електричного потенціалу на поверхні металевого екрана, що оточує ізоляцію, та вибору амплітудного значення фазної напруги на поверхні жили.

Напруженість електричного поля визначається за електричним потенціалом як $\mathbf{\dot{E}} = -\nabla\phi$.

Результати комп'ютерного моделювання. Розраховується електричне поле одножильного 110 кВ кабеля із ЗПЕ ізоляцією з товщиною основного шару ізоляції 16 мм і товщиною напівпровіддних екранів 1 мм.

Рис. 3 показує розподіл напруженості та ізолінії електричного поля $|\mathbf{\dot{E}}|$ в ізоляції з відхиленням від центру відповідно до рис. 1 б (рис. 3 а) та додатково в ізоляційній системі зі зменшенням товщини напівпровіддного екрана по жилі відповідно до рис. 1 а (рис. 3 б). Показано суттєве збільшення поля ($\sim 1,4$ раза) за нерівномірності товщини напівпровіддного екрана. Водночас максимальне значення напруженості поля виявляється в кутках, де починається виступ основної ізоляції в напівпровіддний екран (рис. 3 б). Дані рис. 3 свідчать, що дефекти ізоляції у вигляді ексцентричності й нерівномірності товщини ізоляційного екрана змінюють конфігурацію електричного поля й послаблюють ізоляцію внаслідок локального збільшення поля до 27,6 кВ/мм, що перевищує граничне значення діелектричної міцності поліетилену, яка складає 21,7 кВ/мм [15]. Це означає, що саме ці локальні зони є потенційно небезпечними для руйнування матеріалу.

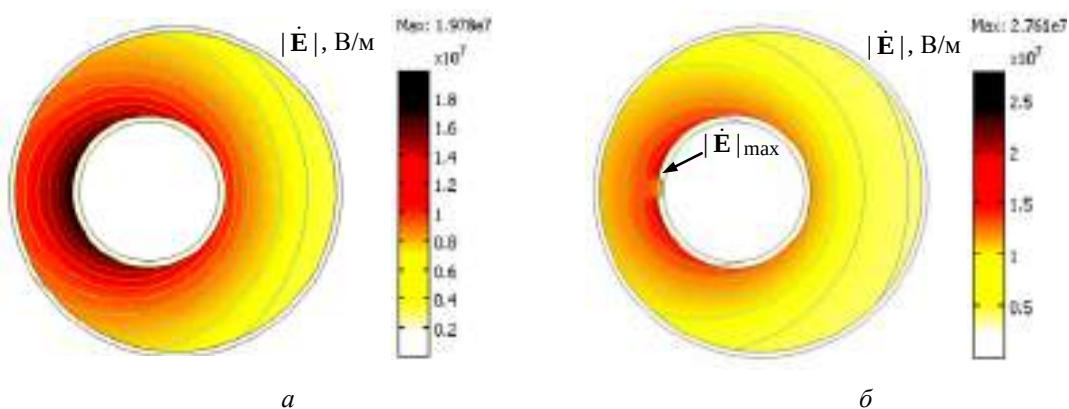


Рис. 3. Розподіл напруженості та ізолінії електричного поля в ізоляції з ексцентричністю відповідно до рис. 1 б (а) та в ізоляції кабеля з нерівномірною товщиною напівпровіддного екрана відповідно до рис. 1 а (б).

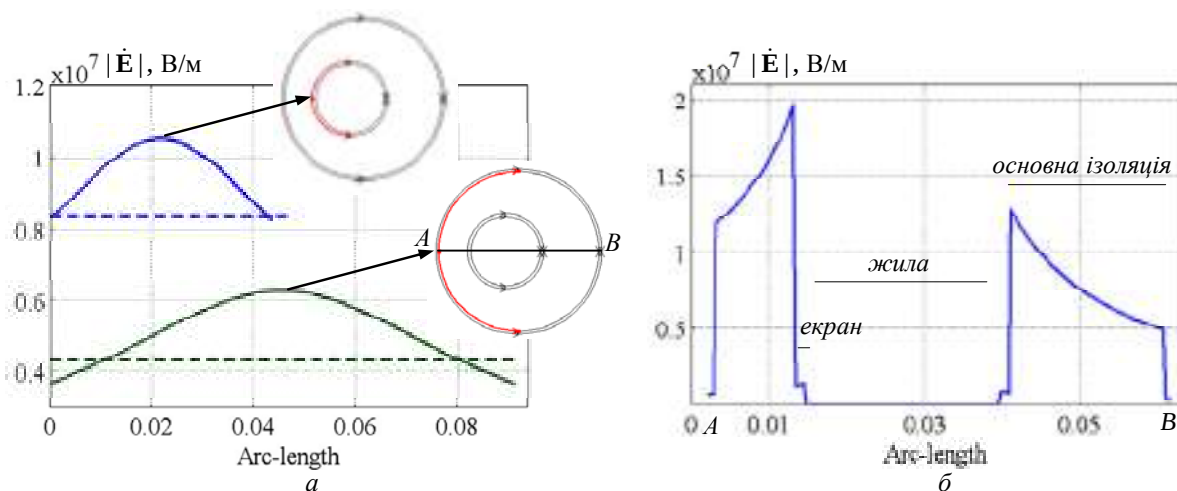


Рис. 4. Змінення електричного поля вздовж половини зовнішньої поверхні напівпровідного екрана по жилі (верхня крива) та половини внутрішньої поверхні екрана по ізоляції з ексцентрисністю (нижня крива) (а). Змінення електричного поля вздовж лінії AB (б)

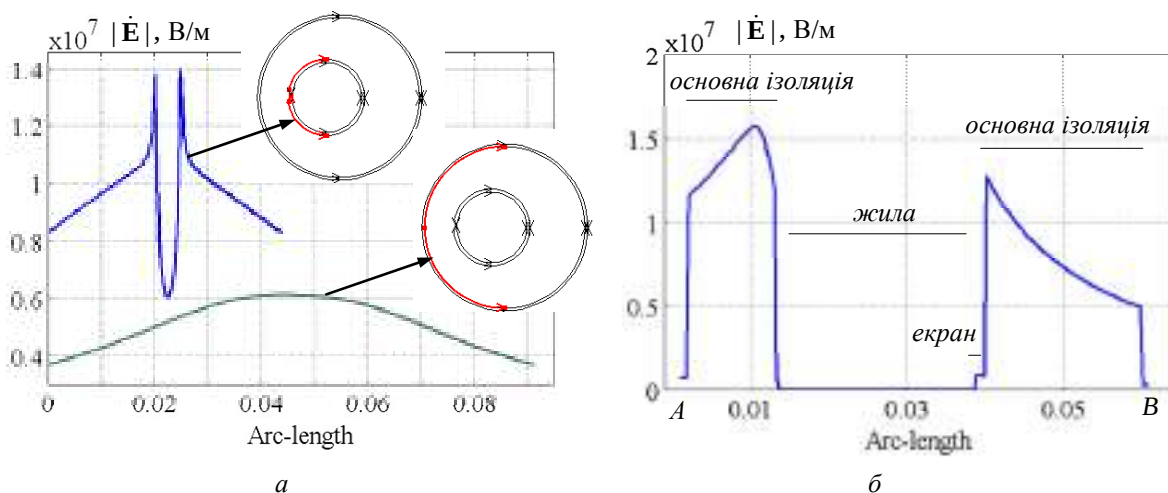


Рис. 5. Змінення електричного поля вздовж половини зовнішньої поверхні внутрішнього напівпровідного екрана (верхня крива) та половини внутрішньої поверхні зовнішнього екрана (нижня крива) для випадків нерівномірності товщини внутрішнього екрана та ексцентрисності ізоляції, відповідно (а). Змінення поля вздовж центральної лінії AB на рис. 4 а для цих випадків (б)

На рис. 4 ілюструється змінення електричного поля $|\dot{E}|$ уздовж половини зовнішньої поверхні напівпровідного екрана по жилі (верхня крива) і половини внутрішньої поверхні екрана по ізоляції (нижня крива) з відхиленням від центру відповідно до рис. 1 б (рис. 4 а). Пунктирні прямі відповідають аналогічним випадкам за нульової (100 %) концентрисності ізоляції. Змінення електричного поля вздовж лінії AB , показаної на рис. 4 а, відображається на рис. 4 б. Найбільші значення $|\dot{E}|$ концентруються поблизу внутрішнього напівпровідного екрана з боку зменшеної товщини ізоляції за її ексцентрисності. Посилює цей ефект наявність нерівномірності напівпровідного екрана по жилі (рис. 5).

Аналогічно до рис. 4 на рис. 5 а показано електричне поле $|\dot{E}|$ вздовж половини зовнішньої поверхні внутрішнього напівпровідного екрана (верхня крива) і половини внутрішньої поверхні зовнішнього екрана (нижня крива) із відхиленням ізоляції від центру і зі стоншеним внутрішнім екраном (відповідно до рис. 1). Змінення поля вздовж центральної лінії AB (див. рис. 4 а) відображено на рис. 5, б. Порівняння даних рис. 4 і 5 показує, що загальний рівень поля вздовж внутрішнього напівпровідного екрана збільшується не набагато (лише в локальних зонах до $\sim 1,3$ рази), а в центрі стоншення екрана навіть зменшується (в $\sim 1,7$ рази) – верхні криві рис. 4 а та 5 а.

Рис. 6 подає змінення максимальної напруженості поля $|\dot{E}|_{\max}$ в ізоляції залежно від значення концентричності ЗПЕ ізоляції, обчислену за формулою (1), у разі дефекту напівпровідного екрана (крива 1) і для бездефектного екрана (крива 2). Як видно, за наявності дефекту перевищується межа міцності поліетиленової ізоляції, тоді високі значення поля можуть призводити до деградації, а з часом до пробігу й виходу ізоляції з ладу.

Висновки. За результатами комп'ютерного моделювання встановлено, що ексцентриситет ізоляції збільшує рівень електричного поля і призводить до неоднорідності розподілу в ній електричного поля (рис. 3, 4). Такі впливи посилюються в разі наявності дефекту напівпровідного екрана (рис. 5).

Показано, що в разі змінення концентричності ізоляції в межах $[0-0,48]$ можливе збільшення максимального значення напруженості електричного поля до 1,3 раза (рис. 6).

У сенсі рівня та однорідності розподілу електричного поля в зшити-поліетиленовій ізоляції її ексцентриситет є негативним фактором і важливою характеристикою для моніторингу і повного усунення в процесі технологічного виробництва силових кабелів для гарантування їхньої високої якості та надійної експлуатації.

Роботу виконано за темою «Розробка основ теорії і методів дослідження впливу несинусоїдних напруг і струмів та виникаючих електротермодинамічних процесів на надійність і ресурс сучасних кабельних ліній електропередачі та на енергоефективність електротехнічних установок резонансного типу» (Шифр "Елрес", Державний реєстраційний номер: 0123U100693), КПКВК 6541030.

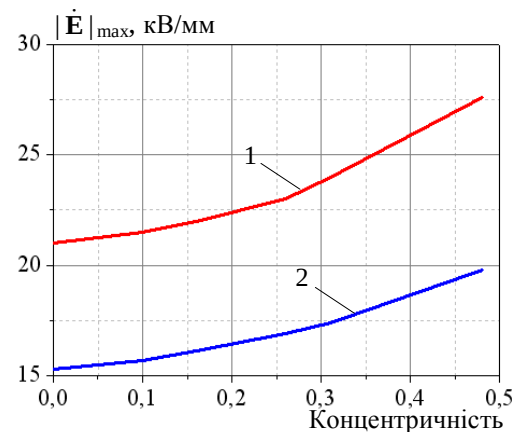


Рис. 6. Залежність змінення максимальної напруженості електричного поля в ізоляції від її концентричності за наявності дефекту напівпровідного екрана (крива 1) та для бездефектного екрана (крива 2).

1. High Voltage Cable Market. URL: <https://straitresearch.com/report/high-voltage-cable-market>
2. Hernandez-Mejia J.C., Elledge S., Riley C., Ramirez D. Cable quality assurance program. NEETRAC (National Electric Energy Testing, Research and Applications Center), IEEE PES ICC Spring 2023, Denver CO, May 2023. 9 p. URL: https://bpb-us-w2.wpmucdn.com/sites.gatech.edu/dist/6/3800/files/2023/08/CableQA_ICC_Spring2023.pdf
3. Національний стандарт України. Кабелі з екструдованою ізоляцією силові та арматура до них на номінальну напругу понад 150 кВ ($U_m = 170$ кВ) і до 500 кВ ($U_m = 550$ кВ). Вимоги та методи випробування (IEC 62067:2011, IDT) ДСТУ IEC 62067:2014. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=60880
4. IEC standard IEC 62067:2022. Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 150 kV ($U_m = 170$ kV) up to 500 kV ($U_m = 550$ kV). Test methods and requirements. URL: <https://webstore.iec.ch/publication/66951> https://webstore.iec.ch/preview/info_iec62067%7Bed2.0.RLV%7Den.pdf
5. ДСТУ IEC 60840:2021 Кабелі силові з екструдованою ізоляцією та арматура до них на номінальну напругу понад 30 кВ ($U_m = 36$ кВ) і до 150 кВ ($U_m = 170$ кВ) включно. Вимоги та методи випробування (IEC 60840:2020). URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=95896
6. IEC standard IEC 60840:2020 Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 30 kV ($U_m = 36$ kV) up to 150 kV ($U_m = 170$ kV). Test methods and requirements. URL: <https://webstore.iec.ch/publication/63025>
7. Humphreys-JONES G. Ultrasonic extrusion quality monitoring of multilayer HV cables during rodution – "a new vision in cable monitoring". 9th International Conference on Insulated Power Cables, Jicable'15, Versailles 21–25 June, 2015. Pp. E8.5, 6 p. URL: http://www.jicable.org/TOUT_JICABLE_FIRST_PAGE/2015/2015-E8-5_page1.pdf
8. Руководящий технический материал по сооружению, испытаниям и эксплуатации кабельных линий с использованием кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 64/110 кВ. Харьков: Майдан, 2007. 62 с.
9. Wang L., Wang C., Cheng J., Zhang T., Wang H. Mathematical model establishment for cable eccentricity online detection system based on X-ray. Proceedings of the 29th Chinese Control And Decision Conference

- (CCDC), 28-30 May 2017, Chongqing, China. Pp. 5957–5960. DOI: <https://doi.org/10.1109/CCDC.2017.7978236>
10. Wen, J.; Zhao, H. On line measurement of cable insulation wall thickness and eccentricity using eddy current. *Proceedings of the 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, 1–5 June 2003; Nagoya, Japan. Pp. 816–819.
 11. Li H., Wentao Jia W. Analysis of cable eccentric diameter measurement based on the production line. *Journal of Physics: Conference Series* 2587(1):012093. ICAMMT-2023, 6 p. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2587/1/012093>
https://www.researchgate.net/publication/373885523_Analysis_of_cable_eccentric_diameter_measurement_based_on_the_production_line
 12. Zhang X., Yin H. A monocular vision-based framework for power cable cross-section measurement. *Energies* www.mdpi.com/journal/energies, 2019. Vol. 12. 26 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/en12153034>
 13. Comsol multiphysics modeling and simulation software. URL: <http://www.comsol.com/>
 14. Щербя А.А., Подольцев О.Д., Кучерява І.М. Електричне поле напівпровідного екрана силового кабелю з полімерною ізоляцією з урахуванням структурних неоднорідностей. *Технічна електродинаміка*. 2024. № 5, с. 3–11. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2024.05.003>
 15. Berger L.I. Dielectric strength of insulating materials. in *Handbook of Chemistry and Physics*. Ed. by W.M. Haynes, D.R. Lide, T.J. Bruno. CRC Press: Taylor & Francis Group, 95-th edition, 2014–2015. Pp. 15-46–15-50. URL: https://chemistry.mdma.ch/hiveboard/rhodium/pdf/chemical-data/diel_strength.pdf
https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4557662/mod_resource/content/1/CRC%20Handbook%20of%20Chemistry%20and%20Physics%2095th%20Edition.pdf

ELECTRIC FIELD IN CROSS-LINKED POLYETHYLENE CABLE INSULATION WITH ECCENTRICITY AND SEMICONDUCTOR SCREEN DEFECT

I.M. Kucheriava

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Beresteyskyi ave, 56, Kyiv, Ukraine
E-mail: rB.irinan@gmail.com

The study of two-dimensional electric field in cross-linked polyethylene (XLPE) insulation with eccentricity and a protrusion of the insulation into the internal semiconducting screen of high-voltage cable is carried out by computer modeling. The non-uniformity of the distribution and the regularities of the change in the level of the electric field depending on the considered defects are analyzed. The dependence of the maximum electric field strength on insulation concentricity (within the range of 0–0.5) is presented. The need to prevent the eccentricity of the XLPE insulation system and its defects in the production process of power cables is grounded to ensure their high quality and further reliable operation. Ref. 15, fig. 6.

Key words: high-voltage cable, cross-linked polyethylene (XLPE) insulation, insulation eccentricity, insulation protrusion, semiconducting screens, electric field, computer modeling.

1. High Voltage Cable Market. URL: <https://straitresearch.com/report/high-voltage-cable-market>
2. Hernandez-Mejia J.C., Elledge S., Riley C., Ramirez D. Cable quality assurance program. NEETRAC (National Electric Energy Testing, Research and Applications Center), *IEEE PES ICC Spring 2023*, Denver CO, May 2023. 9 p. URL: https://bpb-us-w2.wpmucdn.com/sites.gatech.edu/dist/6/3800/files/2023/08/CableQA_ICC_Spring2023.pdf
3. National standard of Ukraine. Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 150 kV ($U_m = 170$ kV) up to 500 kV ($U_m = 550$ kV). Test methods and requirements. (IEC 62067:2011, IDT) DSTU IEC 62067:2014. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=60880 (Ukr)
4. IEC standard IEC 62067:2022. URL: <https://webstore.iec.ch/publication/66951> https://webstore.iec.ch/p-preview/info_iec62067%7Bed2.0.RLV%7Den.pdf
5. National standard of Ukraine (DSTU) IEC 60840:2021 .Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 30 kV ($U_m = 36$ kV) up to 150 kV ($U_m = 170$ kV). Test methods and requirements. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=95896 (Ukr)
6. IEC standard IEC 60840:2020 Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 30 kV ($U_m = 36$ kV) up to 150 kV ($U_m = 170$ kV). Test methods and requirements. URL: <https://webstore.iec.ch/publication/63025>
7. Humphreys-JONES G. Ultrasonic extrusion quality monitoring of multilayer HV cables during roduction – a new vision in cable monitoring. *9th International Conference on Insulated Power Cables*, Jicable'15, Versailles 21–25 June, 2015. Pp. E8.5, 6 p. URL: http://www.jicable.org/TOUT_JICABLE_FIRST_PAGE/2015/2015-E8-5_page1.pdf

8. Guiding technical material on the construction, testing and operation of cable lines using cables with cross-linked polyethylene insulation for voltage 64/110 kV. Kharkov: Maidan, 2007, 62 p. (Rus)
9. Wang L., Wang C., Cheng J., Zhang T., Wang H. Mathematical model establishment for cable eccentricity online detection system based on X-ray. *Proceedings of the 29th Chinese Control And Decision Conference (CCDC)*, 28-30 May 2017, Chongqing, China. Pp. 5957–5960. DOI: <https://doi.org/10.1109/CCDC.2017.7978236>
10. Wen, J.; Zhao, H. On line measurement of cable insulation wall thickness and eccentricity using eddy current. *Proceedings of the 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, 1–5 June 2003; Nagoya, Japan Pp. 816–819.
11. Li H., Wentao Jia W. Analysis of cable eccentric diameter measurement based on the production line. *Journal of Physics: Conference Series* 2587(1):012093. ICAMMT-2023. 6 p. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2587/1/012093>
https://www.researchgate.net/publication/373885523_Analysis_of_cable_eccentric_diameter_measurement_based_on_the_production_line
12. Zhang X., Yin H. A monocular vision-based framework for power cable cross-section measurement. *Energies* www.mdpi.com/journal/energies, 2019. Vol. 12. 26 p. URL :<https://doi.org/10.3390/en12153034>
13. Comsol multiphysics modeling and simulation software. URL: <http://www.comsol.com/>
14. Shcherba A.A., Podoltsev O.D., Kucheriava I.M. Electric field of semiconducting screen in power cable with polymer insulation taking into account structural inhomogeneities. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2024. No. 5. Pp. 3–11. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2024.05.003> (Ukr)
15. Berger L.I. Dielectric strength of insulating materials. in Handbook of Chemistry and Physics. Ed. by W.M. Haynes, D.R. Lide, T.J. Bruno. CRC Press: Taylor & Francis Group, 95-th edition, 2014–2015, Pp. 15-46–15-50. URL: https://chemistry.mdma.ch/hiveboard/rhodium/pdf/chemical-data/diel_strength.pdf
https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4557662/mod_resource/content/1/CRC%20Handbook%20of%20Chemistry%20and%20Physics%2095th%20Edition.pdf

Надійшла: 11.07.2024

Прийнята: 27.08.2024

Submitted: 11.07.2024

Accepted: 27.08.2024

ЕЛЕКТРОСТАТИЧНЕ ПОЛЕ В КАМЕРІ БАР'ЄРНОГО РОЗРЯДУ ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ ВОДИ З УРАХУВАННЯМ ОКРЕМИХ ВОДНИХ КРАПЕЛЬ

Р.С. Кришук

Інститут електродинаміки НАН України
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна
e-mail: dygogive@gmail.com

Використання імпульсного діелектричного бар'єрного розряду (ІДБР) для очищення води за допомогою низькотемпературної плазми (НТП) є перспективною технологією. ІДБР забезпечує очищення води в крапельно-плівковому стані від органічних забруднювачів шляхом утворення високоактивних молекул (радикали OH , O , молекули H_2O_2 , O_3), що генеруються в НТП при контакті з водою. Розроблено двовимірну модель для розрахунку електростатичного поля розрядної камери (РК) для ІДБР, яка включає два електроди, діелектричний бар'єр, дві краплі або струмені води в повітряному проміжку та водяні плівки. У моделі застосовується рівняння Лапласа для електростатичного поля з періодичними граничними умовами. Запропоновано вирази для встановлення довжини симетричної частини РК та визначення напруги на електродах із постійною площею поверхні краплин і постійним середнім значенням напруженості в повітряному проміжку незалежно від радіуса крапель. Проведено дослідження залежності енергії електростатичного поля та ємності РК від радіуса крапель та їхнього взаємного розташування за довжиною РК. Показано зміну напруги на електродах та залежність кількості крапель на одиницю довжини РК від їхнього радіуса. Виконано аналіз розподілу напруженості електричного поля, ємності РК та накопиченої енергії. Досліджено середню напруженість електричного поля на поверхні крапель і плівок води. Встановлено електричні сили, що діють на краплі за допомогою тензора напружень Максвелла. Виведено вираз для розрахунку рекомендованої кількості води в формі крапель або струменів води на одиничні розміри РК для одержання більш рівномірного розподілу напруженості електричного поля в РК та мінімізації впливу електричних сил на краплини. Бібл. 18, рис. 7.

Ключові слова: бар'єрний розряд, математична модель, оптимізація розмірів, електростатичне поле, розрядна камера, очищення води.

Вступ. З огляду на посилення забруднення водойм і річок токсичними органічними сполуками очищення води, зокрема видалення токсичних органічних сполучень, є особливо актуально. Традиційні технології, які використовуються для приведення якості води у відповідність до стандартних вимог, часто виявляються неефективними для руйнування стійких органічних забруднювачів (СОЗ).

Унаслідок збільшення виробництва у фармацевтичній, хімічній та інших галузях промисловості спостерігається зростання кількості СОЗ, що погано піддаються видаленню традиційними методами водоочищення. Це зумовлює необхідність реалізації додаткових етапів очистки на станціях для ефективного видалення СОЗ.

Останні десятиліття відзначені інтенсивними дослідженнями процесів передової окислювальної обробки (AOPs), які генерують високоактивні частинки (радикали OH , O , молекули H_2O_2 , O_3) для очищення води безпосередньо в реакційній зоні. Ці сполуки здатні комплексно руйнувати хімічну структуру СОЗ і сприяти ефективному очищенню [1]. Наприклад, у [2] розглядаються перспективи використання перкарбонату в процесах розвиненої окисної обробки (AOPs) для очищення води, підкреслено його ефективність у видаленні органічних забруднювачів завдяки генерації реактивних кисневих видів, аналізуються механізми окиснення, практичного застосування AOPs і пропонуються стратегії для покращення їхньої ефективності в реальних умовах. У [3] представлено огляд розвитку технологій очищення води з використанням магнітно-відокремлюваних каталітичних матеріалів, механізми активації, повторне використання та можливості оптимізації для поліпшення їхньої ефективності в реальних умовах. Розглядається активізація персульфату (PS) за допомогою магнітно-відокремлюваних каталітичних матеріалів у процесах AOPs для очищення води. У [4] описується новий підхід до створення нанокомпозитних мембран на основі графенового оксиду, які демонструють високу ефективність очищення води. Однією з основних переваг

АОРс над традиційними методами обробки води, такими як хлорування та біологічна обробка, є відсутність потреби у використанні додаткових хімічних речовин, що часто призводить до утворення шкідливих побічних продуктів. Ефективність та доцільність впровадження АОРс визначається кількістю питомих енерговитрат на очищення, оперативними та капітальними витратами на виготовлення та монтаж обладнання [5].

Особливу перспективність для промислового очищення води має низькотемпературна плазма (НТП) [6]. Цей тип плазми відомий під різними назвами, як-от плазмовий струм, діелектричний бар'єрний розряд та коронний розряд, що відображає різноманіття методів її генерації. Високоенергетичні електрони та високоактивні частинки генеруються для безпосереднього окислення розчинених органічних молекул. Ця технологія належить також до типу АОРс. Особливо перспективним у цьому контексті є застосування високовольтних електричних розрядів, зокрема імпульсного діелектричного бар'єрного розряду (ІДБР), який проводиться безпосередньо на поверхню оброблюваної води і демонструє високу енергетичну ефективність [7] порівняно з іншими типами розрядів [6, 8]. Високоактивні частинки генеруються за допомогою НТП у газовому (повітряному) просторі між електродами та водою.

У [6] представлено огляд стану останніх досліджень щодо застосування НТП в очищенні води. Автори акцентують увагу на енергетичних перевагах НТП та описують різні стратегії її використання у водоочищенні. Обговорюються перспективи інтеграції НТП з іншими технологіями, такими як каталіз, мембранна фільтрація та біологічне розкладання. Хоча лабораторні експерименти свідчать про обнадійливі результати для промислового застосування технології НТП, необхідні подальші дослідження та міждисциплінарні колаборації.

Енергетична ефективність ІДБР визначається співвідношенням маси розкладених забруднювачів до витраченої енергії [7, 1]. Серед основних переваг технології ІДБР — висока стерильність обробленої води, відсутність необхідності використання хімічних реагентів та висока ефективність розкладання стійких органічних сполучень, включно з фенолами та їхніми похідними. Наприклад, у [9] представлено новий підхід до деградації бісфенолу А із використанням тривимірної синергетичної системи, що поєднує діелектричний бар'єрний розряд (ДБР), пероцтову кислоту та іони заліза (Fe^{2+}). Дослідження показало, що ця система здатна ефективно знижувати концентрацію бісфенолу А на 97.3 % протягом 15 хвилин завдяки взаємодії між компонентами, що сприяє збільшенню продуктивності реакційних компонентів. Результати також свідчать про зниження токсичності продуктів розпаду порівняно з початковим вмістом бісфенолу А, що вказує на екологічну безпеку цього методу.

Оскільки НТП створюється електричними полями, то теоретичний аналіз електричного поля в розрядних камерах ІДБР для очищення води НТП буде мати позитивний результат для покращення цієї технології із метою збільшення ефективності очищення та зменшення витрат енергії для очищення води [7].

На рис. 1 зображено модель розрядної камери (РК) у двовимірній постановці для ІБР із двома плоскими електродами: катодом 1 та анодом 2, який ізольований діелектриком 3 (бар'єр). У камері знаходиться повітряний проміжок 5, рівномірно заповнений краплинами води (або струменями), що рухаються в напрямку координати z , а також вода у формі плівок (4, 6) на краях повітряного проміжку. Краплини води можуть бути різного діаметру, але за своєю площею рівномірно розподілені в повітряному проміжку.

Про можливість очищення води, що подається в формі краплин, описано в працях [10, 11]. Діаметр досліджуваних краплин може варіюватися від 0,5 до 1,5 мм [10]. У [11] до електродів подавався полідисперсний факел краплин діаметром 0,06 ... 0,5 мм, що мав усереднене значення 0,4 мм, зі

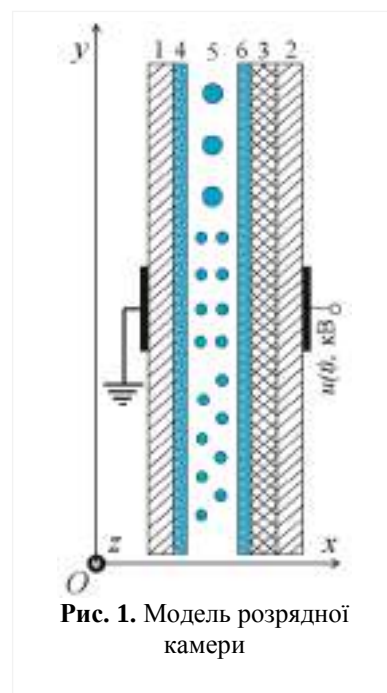


Рис. 1. Модель розрядної камери

швидкістю на вході в розрядну камеру – 2,4 м/с. На анод РК подавалася змінна (імпульсна) напруга $u(t)$ від джерела живлення [12]. Очевидно (рис. 1), що РК – конденсатор із двошаровим діелектриком [13], яким є повітряний проміжок (5) та бар'єр (3). Під час зростання напруги від 0 до амплітудного значення U_m такий конденсатор заряджається, і за певної напруги пробою повітряного проміжку створюється електропровідна НТП. Далі, у разі зростання напруги до значення U_m , через НТП протікає електричний струм, яким заряджається діелектричний бар'єр 3. Процес іонізації повітря, створення НТП та переміщення зарядів через НТП, що з'являється в повітряному проміжку 5 (рис. 1), призводить до генерування хімічно активних частинок [6], запускання хімічних реакцій з органічними сполученнями, що знаходяться в поверхневих шарах води [1, 7, 14, 15].

Очищення води здійснюється близько до її поверхні – на межі вода-повітря [14]. Тому важливо встановити оптимальні розміри і кількість краплин води в повітряному проміжку 5 (рис. 1) з урахуванням розподілу напруженості електричного поля, накопиченої енергії електричного поля та площі поверхні води в повітряному проміжку. Краплини можуть бути розміщені в один або в кілька рядів (рис. 1) за шириною повітряного проміжку з певним кроком за його довжиною. У випадку подачі краплин у кілька рядів доцільно встановити вплив взаємного зміщення краплин за довжиною проміжку на розподіл напруженості електричного поля та сили, що притягують краплини до плівок води під дією електричного поля.

Метою роботи є визначення впливу розмірів та розміщення крапель води на розподіл напруженості та енергетичні характеристики електростатичного поля в повітряному проміжку розрядної камери імпульсного діелектричного бар'єрного розряду з плоскопаралельними електродами для одержання рекомендованої кількості води в повітряному проміжку.

Модель РК зображена на рис. 2. Ескіз демонструє симетричну частину РК у площині xOy , що використовується для моделювання напруженості електростатичного поля у двовимірній постановці методом скінченних елементів. Припускається, що геометрія не змінюється за просторовою координатою z . На рис. 2 *а* краплини розміщені в один ряд за координатою x , на рис. 2 *б* – максимально зміщені за координатою y . Числові позначення 1–6 відповідають складовим частинам РК, наведеним на рис. 1; φ_1 та φ_2 – електричні потенціали на електродах, R_d – радіус краплин, h_s – довжина симетричної частини РК за координатою y . Центри краплин розміщені відповідно на 25 та 75 % від загальної ширини повітряного проміжку 5 уздовж x , що забезпечить симетричний розподіл напруженості електричного поля навколо кожної краплини. Краплини розміщені рівномірно в повітряному проміжку.

Модель передбачає розгляд крапель в їхньому поперечному перерізі, без зміщення за координатою z . Характеристики електростатичного поля в моделі (рис. 2) із плоскими краплями в площині xOy будуть дещо відрізнятися від розрахунків для сферичних крапель у тривимірному просторі [13]. Тому краплі на рис. 2 також можуть інтерпретуватися як водяні струмені вздовж осі z , що плавно переходять у краплини в процесі витікання [11]. У конфігурації на рис. 2 *а* дві краплі розташовані так, що розподіл напруженості навколо них симетричний відносно лінії між краплями. Під час обчислення накопиченої енергії електричного поля, електричної ємності РК, заряду на межах провідник-діелектрик та електростатичних сил на внутрішніх границях моделі довжину РК вздовж координат z і y прийнято вважати рівною одному метру.

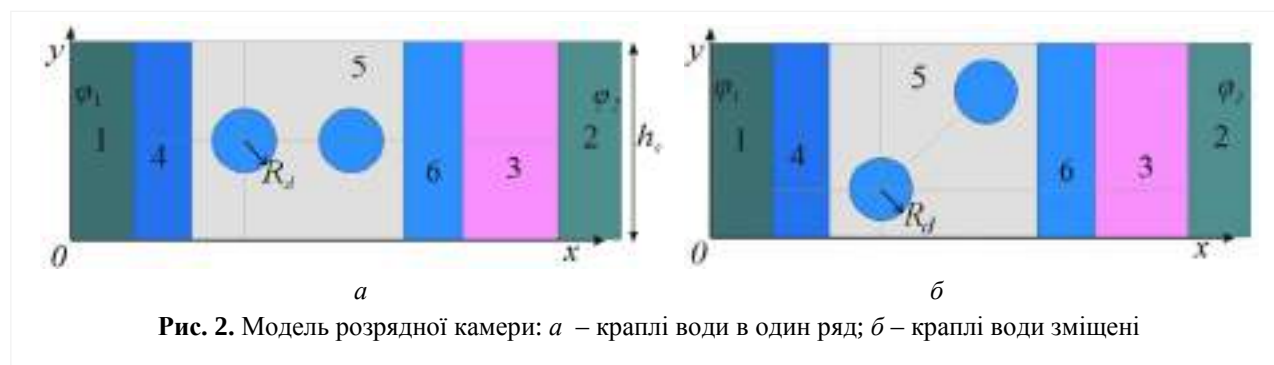


Рис. 2. Модель розрядної камери: *а* – краплі води в один ряд; *б* – краплі води зміщені

Рівняння електричного поля. Для визначення розподілу електростатичного поля застосовується основне рівняння електростатики – рівняння Пуассона [13].

$$\nabla(\nabla\varphi) = -\rho/\varepsilon_a, \quad (1)$$

де $\varepsilon_a = \varepsilon_0\varepsilon_r$, $\varepsilon_r = 1 + \chi_e$.

Тут φ – електричний потенціал, що відображає потенціальну енергію заряду; ∇ – оператор Гамільтона; ρ – об'ємна густина заряду; ε_0 – електрична стала; ε_r – відносна діелектрична проникність; ε_a – абсолютна діелектрична проникність; χ_e – діелектрична сприйнятливості. У розрахунках враховується ε_r у вигляді раціонального числа. Взаємозв'язок між напруженістю електричного поля $\mathbf{E}$, електричною індукцією $\mathbf{D}$, поляризацією $\mathbf{P}$ та електричним потенціалом φ задається такими відомими виразами:

$$\mathbf{E} = -\nabla\varphi, \quad \mathbf{D} = \varepsilon_0\mathbf{E} + \mathbf{P}, \quad \mathbf{P} = \varepsilon_0\chi_e\mathbf{E} \quad (2)$$

Прийнято, що в областях моделі між електродами вільних зарядів немає ($\rho = 0$), тому для моделювання використовується рівняння Лапласа:

$$\frac{\partial^2\varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial y^2} = 0. \quad (3)$$

Граничні умови. У процесі бар'єрного розряду в розрядній камері зі збільшенням напруженості електричного поля в повітряному проміжку 5 (рис. 2) відбувається іонізація. За досягнення певного рівня напруженості формується низькотемпературна плазма (НТП), у якій відбувається перенесення зарядів від електрода 1 до поверхні діелектричного бар'єру 3, що спричиняє його заряджання [1]. У цьому дослідженні процеси іонізації повітря не враховуються, тому модель розглядається до настання іонізації. Відповідно прийнято умову про відсутність вільних зарядів у моделі (рис. 2), що дає змогу використовувати рівняння Лапласа (3). Із урахуванням цієї умови *на межах провідник-діелектрик* (рис. 2) застосовуються відповідні граничні умови [13]:

$$D_n^+ = \sigma, \quad (4)$$

де D_n^+ – нормальна складова індукції зі сторони діелектрика, σ – поверхнева густина заряду на провіднику, Кл/м². Із урахуванням рівняння (4) заряд уздовж межі діелектрик-провідник l на один метр довжини РК уздовж координати z розраховується за таким виразом:

$$q = \int_l D_n^+ dl \quad (5)$$

На границях діелектрик-діелектрик з урахуванням умови відсутності вільних зарядів між електродами РК виконується гранична умова [13]

$$D_n^+ = D_n^-. \quad (6)$$

На лініях симетрії за вертикальною координатою у (рис. 2) застосовано граничні умови періодичності:

$$\mathbf{E}^+ = \mathbf{E}^-, \quad (7)$$

де $\mathbf{E}^+$ – напруженість електричного поля на верхній границі (рис. 2) – площина xOz , $y = h_s$, $\mathbf{E}^-$ – на нижній границі ($y = 0$).

Напруженість електричного поля навколо краплини, що перебуває в однорідному полі, є неоднорідною (E_1) [13]. У міру віддалення від центру краплини в напрямку координати y на певній відстані, залежній від її радіуса, E_1 зростає від нуля до значення однорідного поля E_0 [13]. Висота h_s симетричної частини моделі РК (рис. 2) визначається аналітичним виразом на основі аналітичного методу розрахунку в [13], де розглядається електричне поле навколо циліндра в однорідному електричному полі:

$$h_s = 2R_d \sqrt{\gamma/(1-\sqrt{\beta})}, \quad (8)$$

де $\gamma = \frac{\varepsilon_d - \varepsilon_g}{\varepsilon_d + \varepsilon_g}$, $\beta = E_1/E_0$.

Тут ε_d , ε_g – відповідно діелектрична проникність краплин води та повітря (газу) в повітряному проміжку, E_1 – напруженість електричного поля між краплинами вздовж y . Таким чином, довжина моделі h_s буде змінюватися залежно від радіусу краплин за виразом (8). Якщо краплини є електрично провідні, тоді $\varepsilon_d \rightarrow \infty$ і $\gamma = 1$ [13].

На зовнішніх границях електродів 1 та 2 (рис. 2) за координатою x (площина yOz) подано електричний потенціал відповідно:

$$\varphi_1 = 0 \text{ та } \varphi_2 = U_e - \varphi_1, \quad (9)$$

де U_e – напруга між електродами РК.

У [16] припускається, що оброблення води в газовому проміжку є ефективнішим за умови однорідного імпульсного бар'єрного розряду, тобто рівномірного розподілу розряду в усьому досліджуваному об'ємі. Таким чином, у подальших розрахунках середня напруженість електричного поля (E_5) у повітряному проміжку буде сталою для всіх розмірів краплин.

Напруга на електродах U_e (9) розраховується з урахуванням ширини повітряного проміжку d_g та радіусу краплин R_d , де краплі замінені еквівалентною плівкою води в повітряному проміжку шириною

$$d_d = N_d \pi R_d^2 / h_s, \quad (10)$$

де $N_d = 2$ – кількість краплин (рис. 2).

Складено рівняння балансу напруги в РК:

$$U_e = U_g + U_d + U_f + U_b - U_{gd} - U_{gf}, \quad (11)$$

де U_g – падіння напруги в повітряному (газовому) проміжку шириною d_g між плівками води 4 та 6 (рис. 2); U_d – падіння напруги в еквівалентній плівці d_d (10); U_f – сумарне падіння напруги у плівках води 4, 6 (рис. 2) сумарною шириною d_f ; U_b – падіння напруги в діелектричному бар'єрі; U_{gd} та U_{gf} – падіння напруги в тій частині повітря повітряного проміжку d_g , що витіснена відповідно еквівалентною плівкою d_d та плівками води d_f . Вираз (11) можемо записати так:

$$U_e = \frac{D}{\varepsilon_g} (d_g - d_d - d_f) + \frac{D}{\varepsilon_d} d_d + \frac{D}{\varepsilon_f} d_f + \frac{D}{\varepsilon_b} d_b, \quad (12)$$

де ε_g , ε_d , ε_f , ε_b – абсолютна діелектрична проникність (1) матеріалу, відповідно повітря, краплин води, плівок води та діелектричного бар'єру.

Припустимо, що в повітряному проміжку шириною d_g , у якому також розміщені плівки шириною d_d та d_f , задано напруженість електричного поля E_0 . Тоді вираз (12) має такий вигляд:

$$U_e = E_0 d_g \left(1 - \frac{d_d}{d_g} - \frac{d_f}{d_g} + \frac{\varepsilon_g}{\varepsilon_d} \frac{d_d}{d_g} + \frac{\varepsilon_g}{\varepsilon_f} \frac{d_f}{d_g} + \frac{\varepsilon_g}{\varepsilon_b} \frac{d_b}{d_g} \right). \quad (13)$$

Якщо приймається умова, що вода є електропровідною ($E = 0$), а ширина плівок d_f не знаходиться всередині повітряного проміжку d_g , то вираз (13) запишеться так:

$$U_e = E_0 d_g \left(1 - \frac{d_d}{d_g} + \frac{\varepsilon_g}{\varepsilon_b} \frac{d_b}{d_g} \right). \quad (14)$$

Параметри моделі. Для виконання розрахунку рівняння (3) в областях моделі 1–6 на рис. 2 з граничними умовами (4)–(14) задано параметри: $E_0 = 1$ кВ/мм (у 14); $\beta = 0,86$ (у 8); металеві анод 2 та катод 1 шириною 1 мм; водяні плівки шириною 0,91 мм кожна; діелектричний

бар'єр 3 – $d_b = 1,5$ мм, $\varepsilon_b = 5,5 \varepsilon_0$; повітряний проміжок 5 – $d_g = 3,36$ мм, $\varepsilon_g = 1,0006 \varepsilon_0$; прийнята умова, що краплини води в умовах НТП набувають властивостей провідників ($E=0$), $\varepsilon_d \rightarrow \infty$; радіус краплин R_d – у діапазоні 0,05–0,6 мм з інтервалом 0,05 мм. Зауважимо, що в загальному випадку, якщо вода і краплини води електропровідні, доцільно розглядати модель з їхньою електропровідністю, проте в цій роботі розглядається електростатичне поле (3), в якому для всіх електропровідних елементів задається поле $E = 0$.

На рис. 3 а зображено кількість N_d та площа S_w краплин на 1 м уздовж у, довжина моделі розрядної камери h_s (8). Неважко порахувати, що сумарна довжина границі краплина-повітря має незмінне значення 1,7 м на 1 метр довжини РК уздовж у.

Рис. 3 б ілюструє відповідне середнє значення напруженості

$$E'_0 = \frac{1}{s_g} \int |\mathbf{E}| ds_g, \quad s_g = h_s d_g. \quad (15)$$

та задану напругу на електродах (14). Крива 1 відповідає моделі рис. 2 а, а крива 2 – рис. 2 б. Одержано $E'_0 \approx E_0$ за допомогою виразу (14).

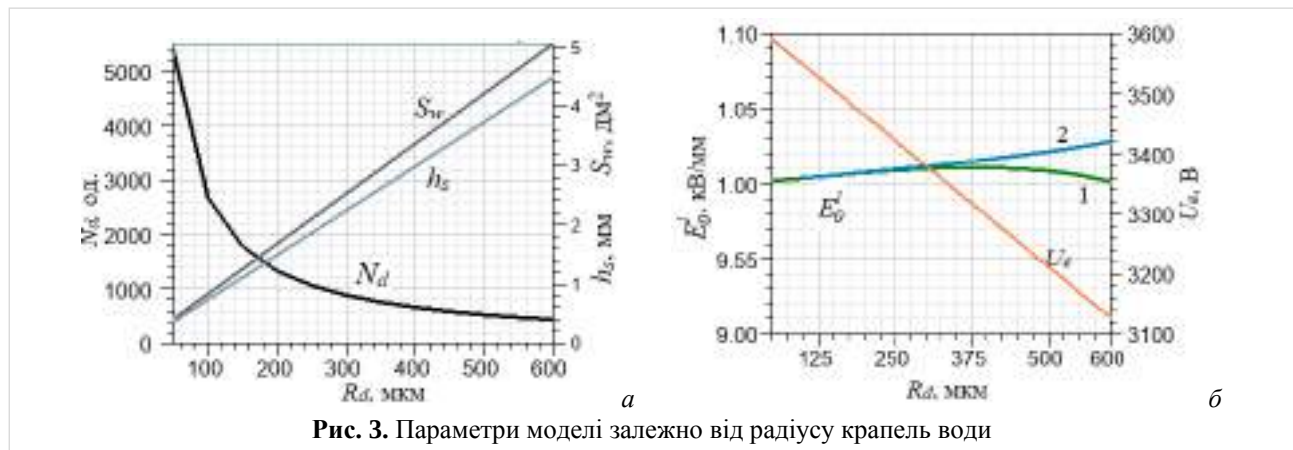


Рис. 3. Параметри моделі залежно від радіусу крапель води

Результати дослідження. Рис. 4 демонструє залежності накопиченої енергії W електростатичного поля та ємності камери як конденсатора C на площу 1 м^2 у площині yOz , оскільки результат розрахунку енергії [13] симетричної частини РК (рис. 2) ділиться на h_s :

$$W = \frac{1}{2h_s} \int (\mathbf{E} \cdot \mathbf{D}) ds = \frac{1}{2h_s} C U_e^2, \quad (16)$$

де s – площа всієї моделі на рис. 2. Оскільки напруженість поля в повітряному проміжку (15) практично постійна (рис. 3 б), то енергія (16) не залежить від радіусу крапель. Тоді ємність відповідно до (16) та (14) прямопропорційно залежить від радіусу краплин за незмінної сумарної довжини границь крапля-повітря на 1 метр довжини РК за координатою у.

Розміщення крапель в один ряд уздовж осі x (рис. 2а), за якого вони перекривають повітряний проміжок на $1/3 \dots 2/3$, підвищує неоднорідність розподілу напруженості, що показано далі на рис. 5. Це створює підсилення не тільки на поверхнях крапель уздовж x , але й у всьому проміжку між краплею та ближчою до краплини водяною плівкою, що призводить до збільшення ємності та енергії на $0 \dots 6$ % (криві 1, рис. 4).

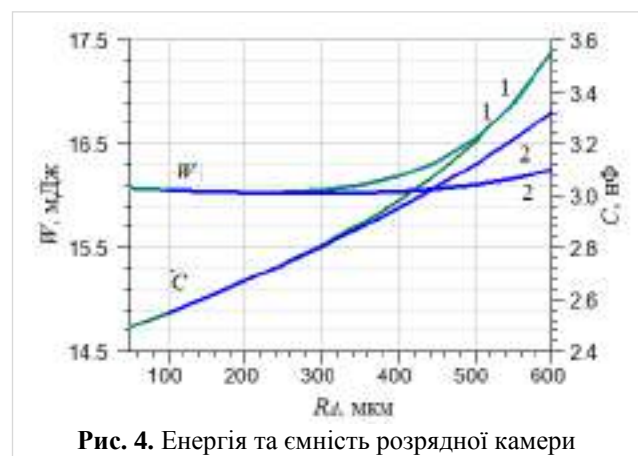


Рис. 4. Енергія та ємність розрядної камери

На рис. 5 показано розподіл напруженості електричного поля через центр краплини – уздовж x та y . Якщо $R_d < 0,30$ мм, підсилення напруженості електричного поля між краплиною та краєм повітряного проміжку відбувається лише біля поверхні краплин, тому криві 1 та 2 на рис. 4 для цих значень R_d співпадають. У той час, коли при $R_d > 0,30$ мм спостерігається підсилення напруженості, що охоплює всю ширину проміжку між краплиною та краєм повітряного проміжку, а також між краплинами для моделі на рис. 2 а, що призводить до збільшення ємності та накопичення енергії (рис. 4, криві 1). Водночас уздовж y напруженість поля E між краплинами майже не залежить від радіусу краплин і встановлена коефіцієнтом β , проте на рис. 5 з унаслідок впливу сусідньої, зміщеної за y краплини $R_d = 0,6$ мм напруженість поля між краплинами збільшена до 1 кВ/мм.

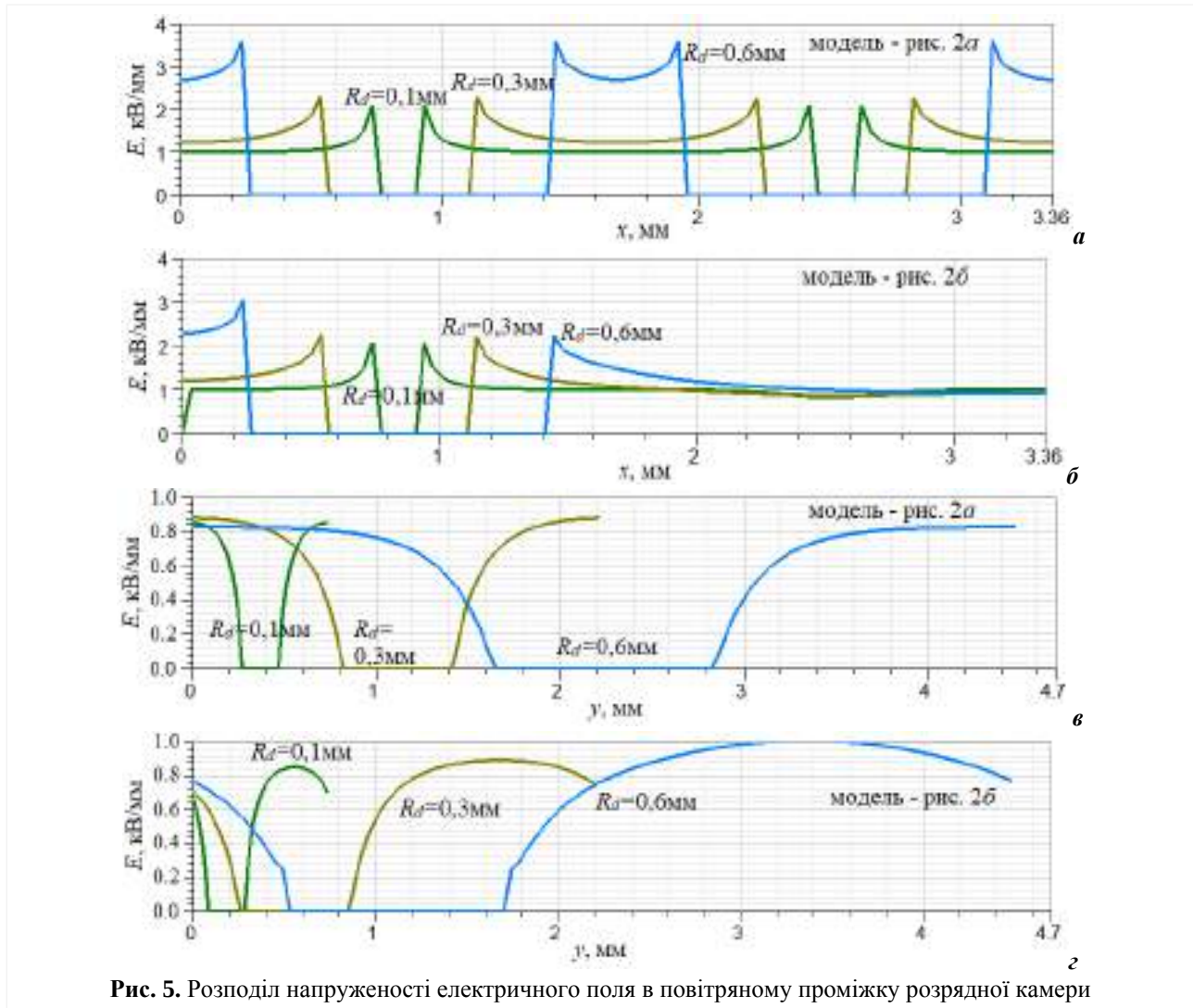


Рис. 5. Розподіл напруженості електричного поля в повітряному проміжку розрядної камери

На рис. 6 зображено результат розрахунку електричної сили F_x (складова сили за координатою x), що діє на поверхню l краплини, яка знаходиться біля плівки 4 на рис. 2:

$$F_x = \oint_l \mathbf{n} \mathbf{T}_{\mathbf{x}\mathbf{n}} dl = \oint_l (T_{xx} \cos(\mathbf{n}, x) + T_{xy} \cos(\mathbf{n}, y)) dl, \quad (17)$$

$$T_{xx} = \varepsilon_0 \left(E_x^2 - \frac{E^2}{2} \right), \quad T_{xy} = \varepsilon_0 E_x E_y,$$

де T_{xx} та T_{xy} – компоненти тензора напружень Максвелла [17], $\cos(\mathbf{n}, x)$ та $\cos(\mathbf{n}, y)$ – косинуси кутів між нормаллю $\mathbf{n}$ до поверхні краплини і осями x та y відповідно, dl – елемент довжи-

ни поверхні краплини у двовимірній моделі (рис. 2), що еквівалентно площі поверхні при $z=1$ м. Для моделі на рис. 2 а сила F_x , що діє на краплину, урівноважена й рівна нулю (крива 1). Крива 2 на рис. 6 (модель на рис. 2 б) показує, що певна сила діє на краплину, якщо з обох боків від неї напруженість електричного поля різна (рис. 5 б).

Оскільки імпульсний бар'єрний розряд генерує НТП, що створює високоактивні частинки на поверхні води – на межі “газ (повітря) – рідина” [18], виконано порівняння середнього значення напруженості електричного поля на поверхні води (рис. 7):

$$E_w = \frac{1}{l} \int_l |\mathbf{E}| dl, \quad (18)$$

де l – лінія на межі “газ–рідина” (рис. 2). Тут криві 1 та 2 – відповідна модель без зміщення краплин за y (рис. 2 а) та зі зміщенням (рис. 2 б). На поверхні краплин середня напруженість електричного поля є більшою порівняно з плівками (рис. 7), причиною чого є округлі форми краплин, які концентрують напрямок силових ліній напруженості електричного поля $\mathbf{E}$ на свою поверхню. Тому на поверхні краплин середня напруженість є на 20 % більшою незалежно від радіуса краплин (рис. 7). Тут, як і на рис. 6 і 4, криві під номером 2 мають більшу величину за радіуса краплин від 0,3 мм і більше, що пояснюється наближеністю крапель до краю повітряного проміжку (рис. 5 а).

Отже, за умови однакового середнього значення напруженості електричного поля в повітряному проміжку з одного боку збільшення радіусу краплин призводить до збільшення напруженості електричного поля на поверхні води (рис. 7; 5 а, б), напруги на електродах (рис. 3) та ємності РК (рис. 4), з іншого – краплини з радіусом понад 0,3 мм, що відповідає $1/3d_g$, будуть притягуватися до стінок (плівок води) повітряного проміжку (рис. 6), оскільки розподіл напруженості поля в повітряному проміжку стає суттєвіше неоднорідним (рис. 5). Тому, зважаючи на формулу (8), запропоновано такий вираз для визначення оптимальної площі (об'єму) краплин води, що одночасно знаходяться і рівномірно розподілені в повітряному проміжку двовимірної моделі РК (рис. 1) на одиницю довжини за координатою y :

$$S_w = \frac{\pi r_d' d_g}{2\sqrt{\gamma/(1-\sqrt{\beta})}}, \quad (19)$$

де $r_d' = 1/6$ – рекомендована величина відносного радіусу (відносно d_g) найбільших краплин води (верхня частина РК на рис. 1), які можуть бути подані у проміжок РК. Для розрахованої площі (19) краплини, що рівномірно розподілені в проміжку, можуть мати будь-який радіус, але не більше r_d' . Також вираз (19) може бути використаний для випадку, якщо в РК (рис. 1) замість краплин знаходяться струмені води у напрямку координати z . Водночас слід ураховувати, що струмені води під час руху можуть перетворюватися на краплини, радіус яких стане більшим, наприклад, у 1,67 раза [16].

Висновки. Розроблено модель для розрахунку розподілу напруженості електричного поля в розрядній камері у двовимірній постановці з краплинами змінного радіусу, яка базується на рівнянні Лапласа та граничних умовах періодичності. Двовимірний модель забезпечує

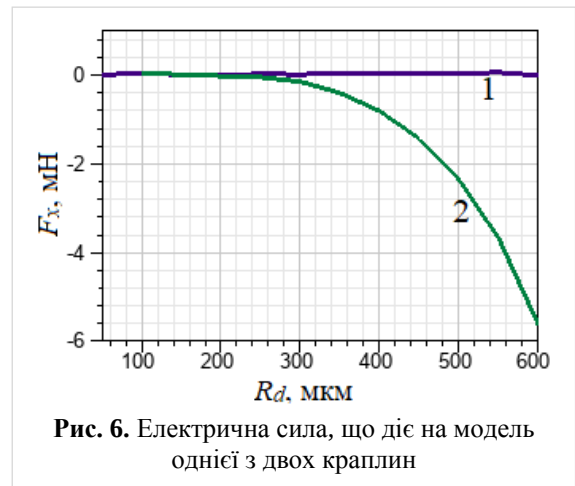


Рис. 6. Електрична сила, що діє на модель однієї з двох краплин

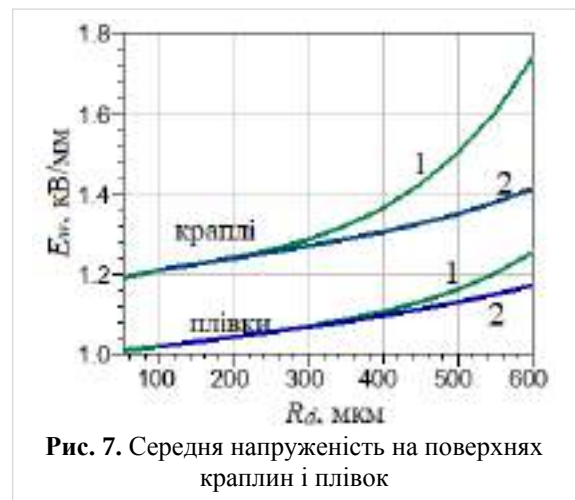


Рис. 7. Середня напруженість на поверхнях краплин і плівок

майже постійне ($\pm 3\%$) середнє значення напруженості поля в повітряному проміжку завдяки заданій напрузі на електродах і незмінну сумарну довжину границь краплина-повітря на 1 м довжини РК за умови мінімальної взаємодії сусідніх крапель у повітряному проміжку РК. У розробленій моделі в перерахунку на одиницю довжини РК енергія електричного поля практично не залежить від радіусу крапель, а електрична ємність та об'єм води крапель змінюються лінійно від їхнього радіусу.

За відносного радіуса крапель менше $1/6$ відносно ширини повітряного проміжку, що припадає на одну краплину, підсилення напруженості поля спостерігається лише поблизу поверхні крапель. За радіуса від $1/6$ до $2/6$ напруженість поля в 1–2 рази підсилюється на всю ширину між краплинами та краєм повітряного проміжку, що призводить до збільшення ємності, накопичення енергії та неоднорідності напруженості електричного поля. Такі краплі зазнають впливу сил електричного поля за мінімальної несиметрії їхнього розміщення за шириною повітряного проміжку.

Використання крапель у повітряному проміжку разом із водяними плівками дає змогу одержати більшу контактну поверхню води з іонізованим повітрям під час очищення води бар'єрними розрядами, водночас середня напруженість поля на поверхні крапель на 20 % вища, ніж на плівках. Це може сприяти збільшенню кількості хімічно активних частинок, що утворюються внаслідок дії НТП у повітряному проміжку.

Запропоновано вираз для розрахунку оптимальної площі (об'єму) крапель або струменів води на одиницю довжини в двовимірній моделі РК за умови, що краплі рівномірно розподілені в повітряному проміжку та мають розрахунковий максимальний радіус, що не перевищує $1/6$ ширини повітряного проміжку. Конкретний радіус крапель або струменів за незмінної площі (об'єму) краплин може бути уточнений на основі експериментальних досліджень.

Роботу виконано за темою "Визначення конструктивних і режимних параметрів електродної системи модульного типу для здійснення бар'єрного розряду на рідину, що знаходиться в краплинно-плівковому стані". (шифр "Електрокрапля"), державний реєстраційний номер 0123U103013.

1. Bereka V., Boshko I., Kondratenko I., Zabulonov Y., Charnyi, D. Onanko Y., Marynin A., Krasnoholovets V. Efficiency of plasma treatment of water contaminated with persistent organic molecules. *Journal of Environmental Engineering and Science*. 2021. Vol. 16. Pp. 40–47. DOI: <https://doi.org/10.1680/jenes.20.00028>
2. Yangju Li, Haoran Dong, Junyang Xiao, Long Li, Dongdong Chu, Xiuzhen Hou, Shuxue Xiang, Qixia Dong, Haoxuan Zhang, Advanced oxidation processes for water purification using percarbonate: insights into oxidation mechanisms, challenges, and enhancing strategies. *Journal of Hazardous Materials*. 2023. Vol. 442. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.130014>
3. Chuan Pu, Gang Lu, Hang Qi, Abdalgali B. Isaev, Mingshan Zhu, Enhanced persulfate activation process by magnetically separable catalysts for water purification: a review. *Chinese Journal of Structural Chemistry*. 2023. Vol. 42. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cjsc.2023.100093>
4. Soomro, Faheeda, Fida Hussain Memon, Muhammad Ali Khan, Muzaffar Iqbal, Aliya Ibrar, Ayaz Ali Memon, Jong Hwan Lim, Kyung Hyon Choi, and Khalid Hussain Thebo, Ultrathin graphene oxide-based nanocomposite membranes for water purification. *Membranes*. 2023. No 13. Pp. 64. DOI: <https://doi.org/10.3390/membranes13010064>
5. Jiang, J. Zheng, S. Qiu, M. Wu, Review on electrical discharge plasma technology for wastewater remediation. *Chemical Engineering Journal*. 2014. No 236. Pp. 348–368. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.09.090>
6. Ahmed Yusuf, Hussein Kehinde Amusa, Jamiu Olanrewaju Eniola, Adewale Giwa, Oluwadamilola Pikuda, Abdallah Dindi, Muhammad Roil Bilad, Hazardous and emerging contaminants removal from water by plasma-based treatment: a review of recent advances, *Chemical Engineering Journal Advances*. 2023. Vol. 14. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.100443>
7. Берека В.О., Кондратенко І.П. Електророзрядні технології обробки води та критерії доцільності їх використання. *Праці ІЕД НАН України*. 2021. Вип. 58. С. 90–100. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2021.58.090>
8. Бобкова Е.С., Гриневиц В.И., Исакина А.А., Рыбкин В.В. Разложение органических соединений в водных растворах под действием электрических разрядов атмосферного давления. *Химия и химическая технология*. 2011. Том 54. Вып. 6. С. 3–17.
9. Yexiang Yang, Yongchun Wang, Wenxuan Jiang, He Guo. Efficient degradation of bisphenol A by a novel ternary synergistic dielectric barrier discharge plasma advanced oxidation process: the role of peracetic acid and ferrous ions. *Separation and Purification Technology*. 2024. Vol. 354. Part 8. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.129568>

10. Tsuomu Kobayash, Taichi Sugai, Taiki Hanga, Yoshi Minamitani, Taisuke Nose. The effect of spraying of water droplets and location of water droplets on the water treatment by pulsed discharge in air. *IEEE transactions on plasma science*. 2010. Vol. 38. No 10. Pp. 2675–2680. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TPS.2010.2047842>
11. Божко І., Кобильчак В. Обробка імпульсним бар'єрним розрядом води в крапельному стані. *Технічна електродинаміка*. 2015. № 3. С. 60–66.
12. Берека В.О., Васецький Ю.М., Кондратенко І.П., Вплив з'єднувального високовольтного кабелю на струми і напруги у пристрої імпульсного бар'єрного розряду. *Технічна електродинаміка*. 2024. № 4. С. 16–23. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2024.04.016>
13. Карпов Ю.О., Ведміцький Ю.Г., Кухарчук В.В., Теоретичні основи електротехніки. Електромагнітне поле: Підручник. Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. 407 с.
14. Берека В.О., Божко І.В., Карлов О.М., Кондратенко І.П. Обробка водного розчину метиленової сині в краплино-плівковому стані імпульсним бар'єрним розрядом. *Технічна електродинаміка*. 2022. № 1. С. 67–74. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.01.067>
15. Берека В.О., Божко І.В., Бржезицький В.О., Гаран Я.О, Троценко Є.А. Моделювання електричного поля в електродній системі задля створення імпульсного бар'єрного розряду в атмосферному повітрі за присутності води в краплинно-плівковому стані. *Технічна електродинаміка*. 2020. № 2. С.17–22. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.02.017>
16. Божко І., Берека В. Однорідність імпульсного бар'єрного розряду в атмосферному повітрі за присутності води в краплинно-плівковому стані. *Технічна електродинаміка*. 2019. № 5. С. 17–20. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.05.017>
17. Тамм І.Е. Основы теории электричества. М.: Наука, 1976. 616 с.
18. Божко І., Кондратенко І. Ефективність обробки водного розчину метиленової сині імпульсним бар'єрним розрядом на його поверхню. *Технічна електродинаміка*. 2018. № 6. С. 89–97. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.06.089>

ELECTROSTATIC FIELD IN A BARRIER DISCHARGE CHAMBER FOR WATER PURIFICATION CONSIDERING INDIVIDUAL WATER DROPLETS

R.S. Kryshchuk

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,

Beresteiskiy Ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine

e-mail: dygogive@gmail.com

The use of pulsed dielectric barrier discharge (DBD) for water purification via low-temperature plasma (LTP) is a promising technology. DBD enables the purification of water in a droplet-film state from organic contaminants by generating highly reactive molecules (OH radicals, O, H₂O₂, and O₃ molecules) produced in LTP upon contact with water. A two-dimensional model was developed to calculate the electrostatic field in the DBD discharge chamber (DC), which includes two electrodes, a dielectric barrier, two water droplets or streams in the air gap, and water films. The model employs Laplace's equation for the electrostatic field with periodic boundary conditions. Expressions were proposed for determining the length of the symmetric part of the DC and setting the voltage on the electrodes with a constant droplet surface area and a constant average electric field intensity in the air gap, independent of droplet radius. The study investigates the dependence of the electrostatic field energy and DC capacitance on the droplet radius and their mutual positioning along the DC length. Changes in electrode voltage and droplet density per unit DC length relative to droplet radius are demonstrated. An analysis of the electric field distribution, DC capacitance, and stored energy was conducted. The average electric field intensity on the surfaces of droplets and water films was examined. The electric forces acting on the droplets were determined using Maxwell's stress tensor. An expression was derived for calculating the recommended amount of water in the form of droplets or streams per unit dimensions of the DC to achieve a more uniform distribution of the electric field intensity within the DC and to minimize the impact of electric forces on the droplets. Ref. 18, fig. 7.

Keywords: barrier discharge, mathematical model, size optimization, electrostatic field, discharge chamber, water purification.

1. Bereka V., Boshko I., Kondratenko I., Zabulonov Y., Charnyi D., Onanko Y., Marynin A., Krasnoholovets V., Efficiency of plasma treatment of water contaminated with persistent organic molecules. *Journal of Environmental Engineering and Science*. 2021. Vol. 16. Pp. 40–47. DOI: <https://doi.org/10.1680/jenes.20.00028> (Ukr)
2. Yangju Li, Haoran Dong, Junyang Xiao, Long Li, Dongdong Chu, Xiuzhen Hou, Shuxue Xiang, Qixia Dong, Haoxuan Zhang, Advanced oxidation processes for water purification using percarbonate: insights into oxidation mechanisms, challenges, and enhancing strategies. *Journal of Hazardous Materials*. 2023. Vol. 442. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.130014>
3. Chuan Pu, Gang Lu, Hang Qi, Abdulgalim B. Isaev, Mingshan Zhu, Enhanced persulfate activation process by magnetically separable catalysts for water purification: a review. *Chinese Journal of Structural Chemistry*. 2023. Vol. 42. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cjsc.2023.100093>
4. Soomro, Faheeda, Fida Hussain Memon, Muhammad Ali Khan, Muzaffar Iqbal, Aliya Ibrar, Ayaz Ali Memon, Jong Hwan Lim, Kyung Hyon Choi, and Khalid Hussain Thebo, Ultrathin graphene oxide-based nanocompo-

- site membranes for water purification. *Membranes*. 2023. No 13. Pp. 64. DOI: <https://doi.org/10.3390/membranes13010064>
5. Jiang, J. Zheng, S. Qiu, M. Wu, Review on electrical discharge plasma technology for wastewater remediation. *Chemical Engineering Journal*. 2014. No 236. Pp. 348–368. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.09.090>
 6. Ahmed Yusuf, Hussein Kehinde Amusa, Jamiu Olanrewaju Eniola, Adewale Giwa, Oluwadamilola Pikuda, Abdallah Dindi, Muhammad Roil Bilad, Hazardous and emerging contaminants removal from water by plasma-based treatment: a review of recent advances, *Chemical Engineering Journal Advances*. 2023. Vol. 14. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.100443>
 7. Bereka, V.O., Kondratenko I.P. Elektrodisharge technologies of water treatment and criteria for their feasibility. *Pratsi IED NAN Ukrainy*. 2021. Issue 58. Pp. 90–100. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2021.58.090> (Ukr)
 8. Bobkova E.S., Grinevich V.I., Isakina, A.A., Rybkin V.V. Decomposition of organic compounds in aqueous solutions under the action of atmospheric pressure electric discharges. *Khimia i Khimicheskaya Tekhnologiya*. 2011. Vol. 54. Issue 6. Pp. 3–17. (Rus)
 9. Yexiang Yang, Yongchun Wang, Wenxuan Jiang, He Guo, Efficient degradation of bisphenol A by a novel ternary synergistic dielectric barrier discharge plasma advanced oxidation process: the role of peracetic acid and ferrous ions. *Separation and Purification Technology*. 2024. Vol. 354. Part 8. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.129568>
 10. Tsuomu Kobayash, Taichi Sugai, Taiki Hanga, Yoshi Minamitani, Taisuke Nose. The effect of spraying of water droplets and location of water droplets on the water treatment by pulsed discharge in air. *IEEE transactions on plasma science*. 2010. Vol. 38. No 10. Pp. 2675–2680. DOI: <https://dx.doi.org/10.1109/TPS.2010.2047842>
 11. Bozhko I., Kobylchak V. Water treatment in the state of drops by pulse barrier discharge. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2015. No. 3. Pp. 60–66. URI: <https://techned.org.ua/index.php/techned/article/view/931> (Ukr)
 12. Bereka V.O., Vasetskyi Yu.M., Kondratenko I.P., Influence of high-voltage connecting cable on currents and voltages in the impulse barrier discharge device. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2024. No. 4. Pp. 16–23. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2024.04.016> (Ukr)
 13. Karpov Yu.O., Vedmitskyi Yu.H., Kukharchuk V.V. Theoretical foundations of electrical engineering. electromagnetic field. Vinnytsia: UNIVERSUM-Vinnytsia, 2008. 407 p. (Ukr)
 14. Bereka V.O., Bozhko I.V., Karlov O.M., Kondratenko I.P., Treatment of methylene blue solution in droplet-film state by impulse barrier discharge. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2022. No. 1. Pp. 67–74. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.01.067> (Ukr)
 15. Bereka V.O., Bozhko I.V., Brzhezitskyi V.O., Haran Ya.O., Trotsenko Ye.A., Modeling of electric field in the electrode system for creating impulse barrier discharge in atmospheric air with water in droplet-film state. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2020. No. 2. Pp. 17–22. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.02.017> (Ukr)
 16. Bozhko I., Bereka V. Uniform of pulse barrier discharge in the air of atmospheric pressure in the presence of water in a drop-film condition. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2019. No. 5. Pp. 17–20. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.05.017> (Ukr)
 17. Tamm I.E. Theory of electricity. M.: Nauka, 1976. 616 p. (Rus)
 18. Bozhko I., Kondratenko I. Efficiency of treatment of aqueous solution of methylene blue via exposure to pulse dielectric barrier discharge to the surface. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2018. No 6. Pp. 89–97. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.06.089> (Ukr)

Надійшла: 17.10.2024

Прийнята: 20.11.2024

Submitted: 17.10.2024

Accepted: 20.11.2024

ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ КОМПЛЕКСИ ТА СИСТЕМИ

УДК 621.313

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2024.69.083>

АСИНХРОННІ ГЕНЕРАТОРИ В АВТОНОМНИХ ДЖЕРЕЛАХ ЖИВЛЕННЯ ЗВАРЮВАЛЬНОЇ ДУГИ. СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ

Л.І. Мазуренко, докт. техн. наук, О.В. Джура, канд. техн. наук, М.О. Шихненко, канд. техн. наук, О.А. Білик

Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Берестейській, 56. Київ, 03057, Україна
e-mail: mlins@ied.org.ua

Стаття спрямована на узагальнення результатів дослідження асинхронних генераторів (АГ) автономних джерел живлення зварювальної дуги (ДЖЗД), отриманих у відділі електромеханічних систем Інституту електродинаміки НАНУ. Розглянуто запропоновану класифікацію АГ автономних зварювальних систем, розроблені математичні моделі, результати розрахункових та експериментальних досліджень таких систем із АГ із конденсаторним збудженням і некерованим випрямлячем, у коло постійного струму якого підключено високочастотні інвертори, широтно-імпульсні регулятори або напівмостові інвертори, а також генератори з вентильним і вентильно-конденсаторним збудженням. Розглянуто особливості проектування, експериментальні зразки джерел живлення зварювальної дуги з АГ. Визначено напрямки подальших досліджень. Бібл. 42, рис. 5.

Ключові слова: джерело живлення зварювальної дуги; асинхронний генератор; конденсаторне, вентильне, вентильно-конденсаторне збудження; напівмостовий і високочастотний інвертори; широтно-імпульсний регулятор; математична модель; розрахункові та експериментальні дослідження.

Вступ. Під час виконання зварювальних робіт на таких віддалених від електромереж об'єктах, як нафто- і газопроводи, водопроводи тощо висуваються підвищені вимоги до характеристик і можливостей автономних зварювальних агрегатів. Автономні зварювальні агрегати (мультисистеми) повинні мати єдине джерело електроенергії і забезпечувати різні види зварювання (ручне дугове, в захисному газі тощо). Крім цього, часто виникає необхідність в багатопостовому зварюванні. Для цього широко застосовуються багатопостові зварювальні агрегати, що пов'язано з особливостями виконання робіт на об'єктах, де на невеликих площах необхідно розмістити певну кількість (до 8 одиниць) зварювальних постів. Серед вимог до мостових зварювальних агрегатів основним є незалежність роботи постів зварювання за її одночасної роботи, що пов'язано з забезпеченням якості зварних з'єднань. Крім того, у разі застосування багатопостових зварювальних агрегатів одночасно відбувається значна економія палива, оскільки генераторний агрегат, який живить кілька постів зварювання, практично не працює в режимі холостого ходу.

В автономних джерелах живлення зварювальної дуги (ДЖЗД), що забезпечують різні зовнішні характеристики, використовують синхронні генератори, вентильні генератори індукторного типу та меншою мірою колекторні генератори постійного струму [1–5]. Вони є основою однопостових і багатопостових структур. Однак індукторні генератори мають порівняно з іншими електричними машинами більшу масу, менший ККД і низькі динамічні показники, що збільшує тривалість відновлення напруги після короткого замикання, чим ускладнює збудження дуги. Недоліком генераторів постійного струму є наявність колектора, а син-



хронних – складна конструкція. Тому існує науково-технічна проблема створення енергоефективних ДЖЗД, які могли б забезпечити різні зовнішні характеристики та ефективно працювати в багатопостових структурах. Радикальний шлях удосконалення автономних зварювальних систем – їхнє створення на основі асинхронних генераторів (АГ), які позбавлені недоліків індукторних генераторів і генераторів постійного струму. Тому доцільно їх використовувати як генератори зварювальних установок. Наукові дослідження в цьому науковому напрямку проводяться у відділі електромеханічних систем Інституту електродинаміки НАН України.

Мета статті. Метою статті є узагальнення результатів дослідження АГ із блоками формування зварювальних характеристик автономних ДЖЗД, отриманих у відділі електромеханічних систем Інституту електродинаміки НАНУ, та визначення напрямків їхнього подальшого розвитку.

Класифікація АГ автономних зварювальних систем. Запропоновано класифікацію АГ автономних зварювальних систем, яка базується на способах їхнього збудження, принципах формування зовнішньої характеристики та кількості зварювальних постів.

Залежно від способу збудження й отримання реактивної потужності (РП) автономні АГ із збудженням із боку статора поділяються на три основні групи: АГ з конденсаторним збудженням (КЗ) [6–13]; АГ з вентильним збудженням (ВЗ) [14–17]; АГ з вентильно-конденсаторним збудженням (ВКЗ) [18–21]. У генераторах із конденсаторним збудженням РП для роботи в режимі самозбудження подається конденсаторною батареєю, що під'єднана до обмоток статора. У генераторах зі ВЗ ця потужність забезпечується напівпровідниковим перетворювачем. Коли одна частина РП надходить від конденсаторних батарей у колах статора, а друга – від напівпровідникового перетворювача, то такі генератори відносяться до третьої групи.

У випадку використання в автономних зварювальних установках АГ із КЗ можливо здійснити як параметричне формування зварювальної вольт-амперної характеристики (ВАХ), так і формування з використанням зворотних зв'язків. У першому випадку використовуються виключно некеровані (пасивні) елементи з лінійними і нелінійними ВАХ, такі як дроселі, трансформатори, некеровані випрямлячі, а вимірювальні елементи у вихідних колах відсутні, що сприяє підвищенню надійності ДЖЗД. У ДЖЗД із замкненими за струмом і напругою дуги системами формування зовнішніх характеристик (ЗСФЗХ) передбачена наявність вимірювальних і регулюючих елементів у вихідних колах, які працюють частіше в імпульсному режимі. На відміну від джерел із параметричними системами формування зварювальних характеристик (ПСФЗХ) вони можуть бути адаптовані для багатопостового електрозварювання і для створення зварювальних мультисистем та аналогічно ДЖЗД із ПСФЗХ можуть виконуватись на основі АГ із однією і більше статорних обмоток. Асинхронні генератори з ВЗ і ВКЗ виконуються з ЗСФЗХ і можуть бути однопостовими і багатопостовими.

Розроблено схемотехнічні рішення автономних зварювальних АГ із КЗ із некерованим випрямлячем, у коло постійного струму якого підключені високочастотні інвертори (рис. 1) або широтно-імпульсні регулятори (ШІР) (рис. 2), або напівмостові інвертори (рис. 3), а також АГ із ВЗ і ВКЗ (відповідно рис. 4 і 5). У випадку АГ із ВКЗ на клеми постійного струму підключаються зварювальні інвертори [22–29].

На вказаних рисунках використані такі позначення: В, В1, В2 – випрямлячі; ВІ – високочастотний інвертор; Т – трансформатор; БК – батарея конденсаторів; Р1 ... РN – широтно-імпульсні регулятори; ЗІ1, ЗІ2 – зварювальні інвертори; R_o – опір для збереження області вентильного самозбудження; R_d – змінний опір дуги; ВП – вентильний перетворювач. Інші позначення елементів схем на рисунках – загальноприйняті [22–26].

Розвиток теорії. Математичне моделювання ДЖЗД на основі АГ. Одним із режимів роботи автономних асинхронних генераторів у ДЖЗД є режим роботи на випрямляч із РС-навантаженням, практично аналогічний режиму роботи АГ із випрямлячем на ВІ або ШІР. Математичну модель (ММ) АГ із КЗ із одною статорною обмоткою, що працює на випрямляч з RL – навантаженням, наведено в [30].

Була розроблена нова математична модель АГ з двома статорними обмотками з КЗ для різних варіантів їхнього з'єднання з випрямлячем і RC-навантаженням. Запропонована модель АГ базується на моделі електричної машини в неперетвореній системі координат із урахуванням насичення по першій гармоніці поля за робочим потоком взаємодукції. Рівняння, з яких складається модель, умовно можна розділити на рівняння кіл обмотки збудження (ОЗ), робочої обмотки (РО), обмотки ротора, рівняння врахування насичення і рівняння навантаження випрямляча. Усі параметри ротора, РО зведені до ОЗ. За допомогою ідеальних трансформаторів зведені струми і напруги РО перетворені до реальних [31].

Адекватність цієї ММ перевірена шляхом порівняння результатів чисельного і фізичного експерименту. На основі запропонованої моделі АГ із двома обмотками статора з КЗ і випрямлячем розроблено модель, в якій у коло постійного струму останнього підключено один або кілька зварювальних постів на основі ШПР [32].

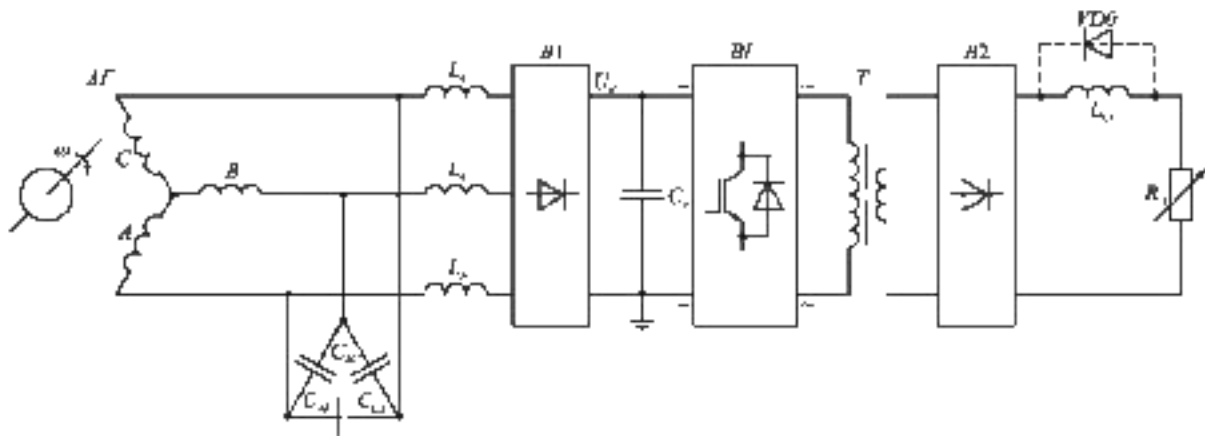


Рис. 1. Асинхронний генератор з високочастотним інвертором для ДЖЗД

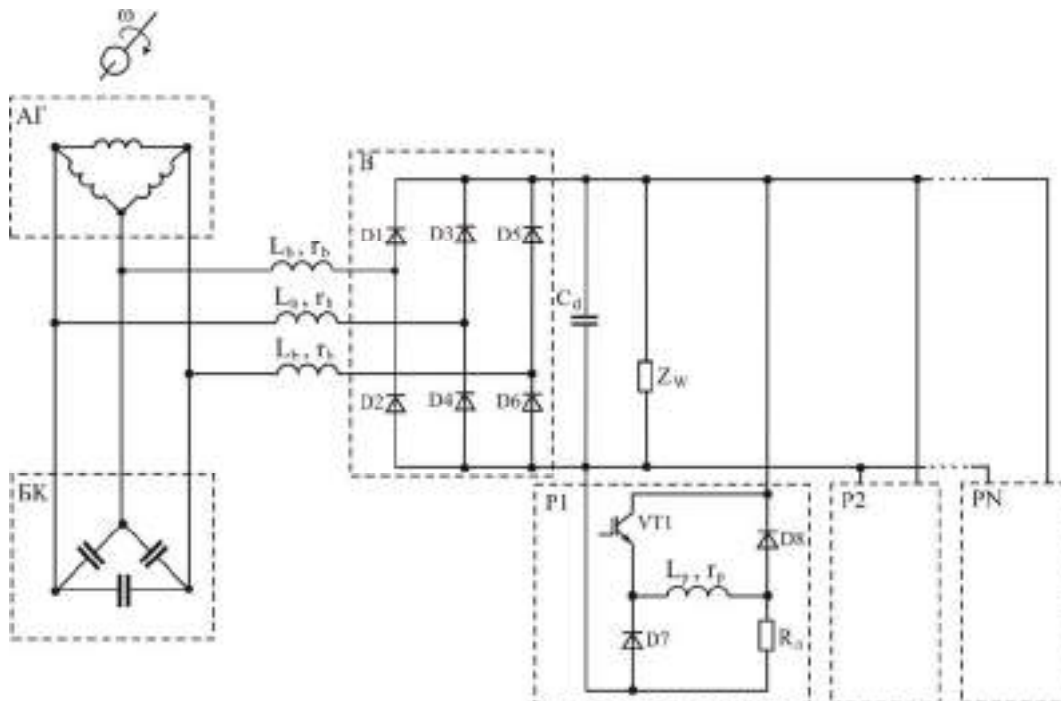


Рис. 2. Асинхронний генератор з ШПР для ДЖЗД

Розроблено ММ зварювального комплексу, основними структурними елементами якого є АГ з однією обмоткою статора, батарея конденсаторів збудження, випрямляч і декілька ШПР залежно від кількості зварювальних постів. Математична модель машини представлена в нерухомій щодо статора фазній системі координат А, В, С. Під час моделювання ви-

прямляча була використана методика, згідно з якою реальний діод замінюється активно-індуктивним елементом, опір якого залежно від напрямку струму, що протікає через діод, приймає два дискретних значення, які відповідають провідному і невідному його станам. Запропоновано принципи керування ШІР [22].

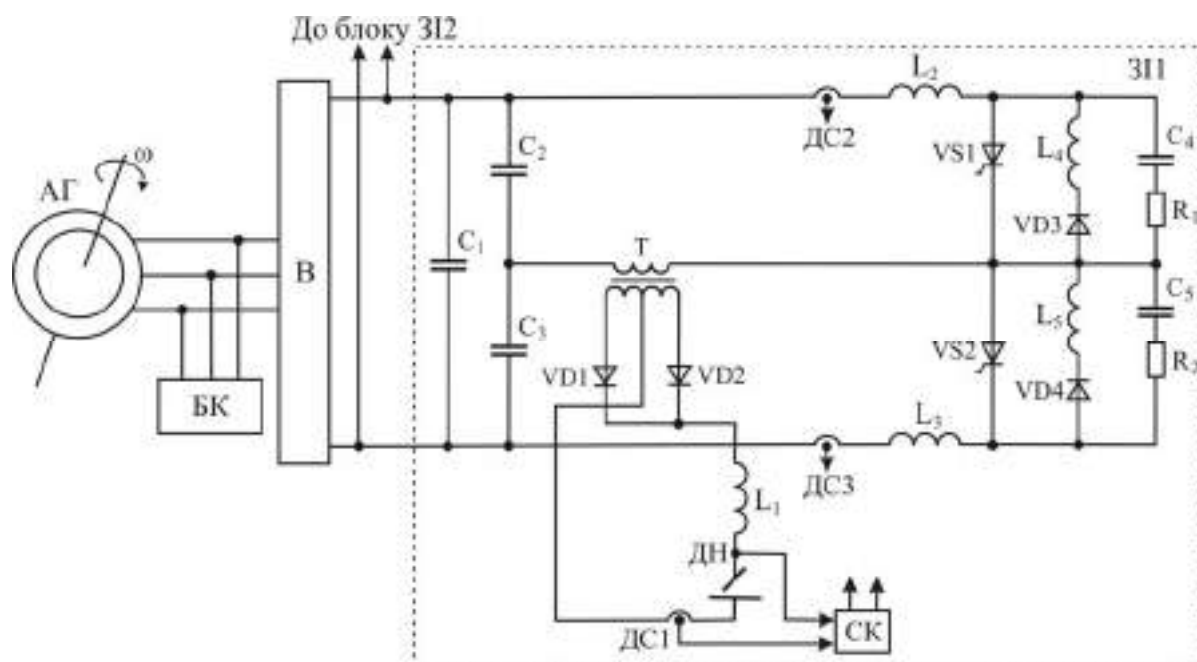


Рис. 3. Асинхронний генератор з напівмостовим інвертором ДЖЗД

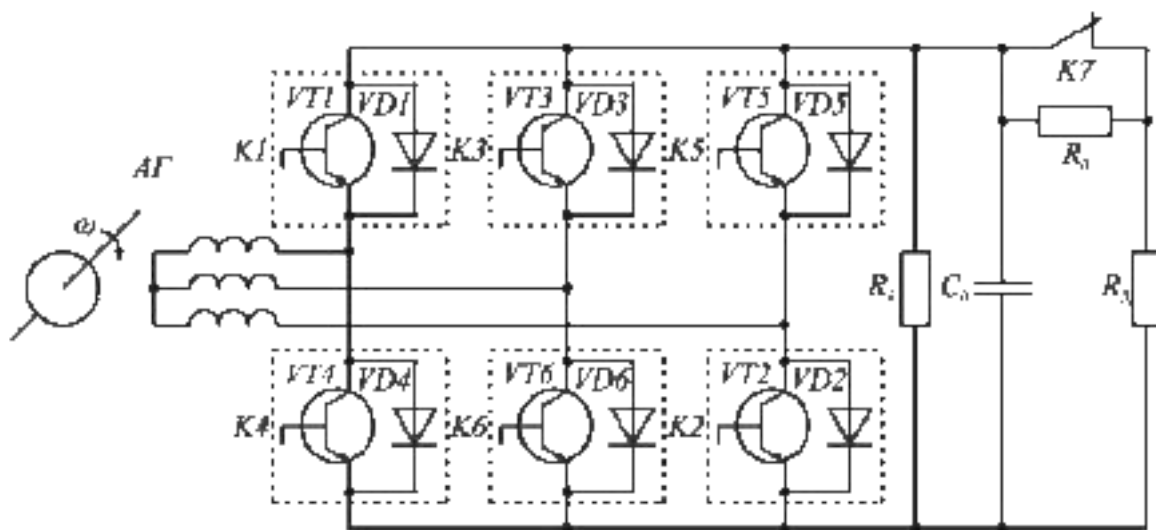


Рис. 4. Асинхронний генератор з вентильним збудженням ДЖЗД

Розроблено ММ зварювального комплексу на основі АГ з однією статорною обмоткою і збудженням від конденсаторів та височастотним постовим перетворювачем інвертного типу. Модель отримана на основі моделей таких структурних елементів комплексу: АГ із конденсаторною системою збудження; трифазний мостовий випрямляч, інвертор, трансформатор, вихідний випрямляч із навантаженням. Генератор представлено в нерухомій щодо статора фазній системі координат А, В, С. Моделі трифазного мостового випрямляча і вихідного випрямляча з навантаженням отримані за умови заміни діодів активно-індуктивними опорами. Рівняння інвертора враховують заміну транзисторно-діодних ключів ідеальними ключами. Для об'єднання моделей трансформатора та інших структурних елементів модель повинна оперувати з неприведеними величинами струмів і напруг. Для цього використано

перехід до схеми заміщення трансформатора, в якій параметри вторинної обмотки приведені до первинної обмотки, підключено ідеальний трансформатор [25, 33].

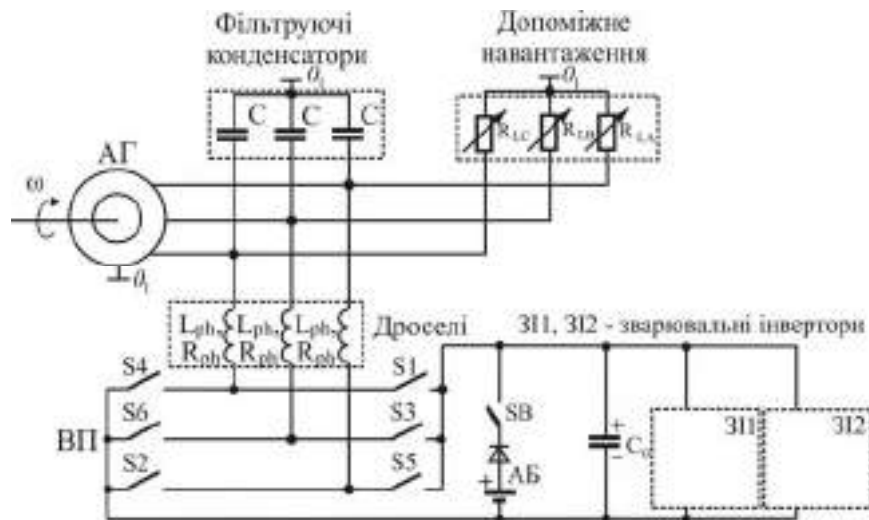


Рис. 5. Асинхронний генератор з вентильно-конденсаторним збудженням ДЖЗД

Розроблено SIMULINK – моделі напівмостового інвертора та його системи керування, що є структурними елементами однопостових і багатопостових ДЖЗД на основі АГ із КЗ. Розроблено також SIMULINK – модель дуги, яка може бути використана для моделювання статичних характеристик ДЖЗД у режимах короткого замикання та робочому [34].

Запропоновано математичну модель АГ із ВЗ, розроблену з використанням методу припасування, за допомогою якої можливо розраховувати електромагнітні процеси в генераторі в разі навантаження у вигляді зварювальної дуги та зовнішні характеристики, розбіжність яких з експериментальними не перевищує 2...6 % залежно від струму зварювання [3]. Метод припасування розроблено відносно асинхронних машин із напівпровідниковим перетворювачем у колах статора. Водночас ММ на основі цього методу базується на миттєвих схемах заміщення АГ із ВЗ і не потребує інформації про стан напівпровідникових елементів на кожному кроці розв'язку диференціальних рівнянь [35].

Запропоновано наукові підходи до розрахунку характеристик автономних зварювальних АГ із ВЗ із використанням схем заміщення [36–38], а також отримано передавальну функцію, яка використана для дослідження таких генераторів [39].

Для дослідження електромеханічних процесів ДЖЗД на основі генератора з вентильно-конденсаторною системою збудження і зварювальними інверторами, що підключені на клема постійного струму генератора, розроблено динамічну імітаційну модель, яка реалізує два алгоритми векторного керування: перший базується на гістерезисному управлінні струмом, а другий – на алгоритмі широтно-імпульсної модуляції просторового вектора [26].

Під час розробки моделей ДЖЗД із АГ розвинуто блочно-системний метод моделювання складних машино-вентильних систем з асинхронними машинами в області об'єднання структурних елементів, що вперше забезпечило створення математичних моделей АГ із КЗ із однією і двома статорними обмотками з різними схемами їхнього з'єднання з блоками формування зовнішніх зварювальних характеристик на основі випрямлячів і напівмостового інвертора, ШІР, височастотного інвертора, а також АГ із ВЗ і ВКЗ. На клема постійного струму АГ із ВКЗ, як було вказано раніше, підключаються зварювальні інвертори.

Розрахункові та експериментальні дослідження ДЖЗД на основі АГ. Комплекс досліджень режимів роботи ДЖЗД із АГ, проведений за допомогою розроблених математичних моделей та фізичного моделювання, дав змогу отримати ряд нових наукових і практичних результатів [32, 34].

Обґрунтовано перспективність застосування ДЖЗД на основі АГ із замкненими за струмом і напругою системами формування зовнішніх характеристик для побудови автономних зварювальних мультисистем.

За допомогою створеного комплексу комп'ютерних програм досліджено електромагнітні процеси та встановлено робочі характеристики ДЖЗД на основі АГ з однією та двома обмотками статора з некерованим випрямлячем і ШІР, високочастотним інвертором за крутоспадних і жорстких зовнішніх характеристик в однопостовому і багатопостовому виконанні.

Розроблено деталізовані алгоритми керування, схемотехнічні рішення та керувальні програми мікропроцесорних систем керування АГ із некерованим випрямлячем і ШІР та АГ із багатофункціональним вентильним перетворювачем, що одночасно формує зварювальні характеристики, забезпечує генератор РП та регулює його ковзання.

Для використання серійних асинхронних двигунів як АГ ці рекомендації щодо вибору типорозміру машини для такого технічного рішення ДЖЗД за заданої величини номінального зварювального струму. Для АГ із ВІ розроблено алгоритм фазового керування, що дає змогу мінімізувати постійну складову струму первинної обмотки високочастотного трансформатора для запобігання його намагнічування.

Проведено аналіз схемних рішень автономних ДЖЗД та визначено оптимальну структуру багатопостового зварювального агрегату, побудованого на основі АГ із КЗ та постових напівмостових інверторних перетворювачів. Трифазна напруга АГ випрямляється випрямлячем і подається на постові інвертори напруги, в яких вона перетворюється на напругу високої частоти за допомогою керованих інверторів напруги, трансформується і після випрямлення подається на пост зварювання.

Однією з основних умов забезпечення сталого процесу ручного дугового зварювання є забезпечення відповідної зовнішньої характеристики джерела живлення дуги, а саме нахил зовнішньої характеристики в зоні номінального струму. Розглянуто енергетичні процеси дугового проміжку та сформульовано вимоги до ВАХ постових напівмостових інверторів напруги з метою забезпечення стійкості процесу зварювання [40].

Розроблено новий алгоритм управління зовнішньою характеристикою постових напівмостових інверторів, що відрізняється швидкодією, забезпечує стійкість процесу зварювання та усуває взаємний вплив постів зварювання. Відповідно до цього принципу струм зварювання, як найбільш інерційна компонента, приймається як незалежна змінна, а параметром регулювання є напруга на дуговому проміжку, яка визначається системою управління й автоматично підтримується. Для цього в системі управління використовується не тільки зворотний зв'язок за струмом, як це зроблено в сучасних системах управління, а також і за напругою дуги. Така система управління (зі зв'язками за струмом та напругою) забезпечує стабільність зовнішніх характеристик джерела в разі коливання параметрів навантаження (коливання довжини дуги) і, що особливо важливо, коливання напруги генератора. Останнє має важливе значення для незалежної роботи постів у багатопостових структурах.

Розроблені математичні моделі АГ із урахуванням насичення магнітних ланцюгів та наявності напівпровідникових елементів у ланцюгах статора дали змогу визначити зовнішні характеристики АГ під час роботи на напівмостові інвертори.

Розроблена математична модель постового напівмостового інвертора (постового джерела живлення) дала змогу дослідити електромагнітні процеси в силових елементах постового інвертора напруги за різних законів управління. За допомогою моделі відпрацьовано закони управління постовим інвертором у різних режимах роботи.

Вперше науково обґрунтовано принципи керування автономним машино-вентильним комплексом на основі АГ із ВЗ, в якому напівпровідниковий перетворювач забезпечує генератор реактивною потужністю, змінює його ковзання залежно від навантаження, виконує функції випрямляча та формує крутоспадні і жорсткі зварювальні характеристики.

Установлено зв'язок між опором дуги і ковзанням АГ із ВЗ, що дає змогу визначити як робочий діапазон ковзання, так і мінімальний опір у колі постійного струму для забезпечення роботи генератора в області самозбудження. Це дало змогу розробити методику розрахунку робочих характеристик зварювального АГ із ВЗ, яка базується на його схемі заміщення.

Досліджено електромагнітні процеси зварювального АГ із ВЗ при формуванні круто-спадних і жорстких характеристик, що дало змогу встановити показники якості перехідних процесів під час роботи контура стабілізації напруги або струму. Показано, що для забезпечення роботи АГ із ВЗ в області існування квазісталих режимів вентильного збудження за значень опору дуги близьких до нуля необхідно в колі постійного струму вмикати додатковий опір (для експериментального зразка від 0,2 до 0,4 Ом), який не впливає на енергетичні показники генератора, оскільки в робочих режимах шунтується.

Проектування ДЖЗД на основі АГ. Визначено особливості проектування ДЖЗД на основі АГ для зварювальних мультисистем і розроблено підходи до розрахунку та рекомендації з проектування окремих функціональних блоків: електричної машини та систем збудження; випрямлячів; широтно-імпульсного регулятора струму, напівмостового інвертора; систем керування.

Запропоновано математичну модель і методику розрахунку ШПР та методику розрахунку параметрів трифазного випрямляча. Модель дає змогу нехтувати пульсаціями вхідної напруги, досліджувати процеси в регуляторі з урахуванням зовнішньої характеристики АГ. Методика розрахунку ШПР базується на запропонованому законі регулювання напруги ШПР [22], а методика розрахунку випрямляча враховує обмін енергією між дроселем ШПР і конденсатором на його виході в разі обриву зварювальної дуги і вимикання транзисторного ключа.

Рекомендовано використовувати в ДЖЗД на основі АГ мікропроцесорні системи керування, що пов'язано зі складними алгоритмами керування. Розглянуто приклади практичної реалізації таких систем керування в ДЖЗД на основі АГ із КЗ і ШПР, а також АГ із ВЗ.

Експериментальні зразки ДЖЗД на основі АГ. Розроблено, виготовлено та досліджено експериментальні зразки двопостових ДЖЗД на основі АГ із КЗ із постовими напівмостовими інверторами та ШПР, а також зразок однопостового ДЖЗД із АГ із ВЗ. У зразку з постовими напівмостовими інверторами запропонований новий алгоритм частотного керування інверторами, який забезпечує їхню стійку роботу в динамічних режимах за різних змін режимів роботи поста зварювання (коротке замикання, режим зварювання, холостий хід). Проведено дослідження електромагнітних процесів та робочих характеристик ДЖЗД на основі АГ. Результати експериментальних досліджень підтвердили правильність викладених положень теорії, принципів побудови і керування, математичних моделей, методик і методів розрахунку АГ із блоками формування зварювальних характеристик.

Напрямки подальших досліджень. У раніше розроблених математичних моделях АГ із двома статорними обмотками осі фаз обмоток співпадали у просторі [30]. Розроблена ММ асинхронного генератора з двома статорними обмотками, осі фаз яких зсунуті у просторі на довільний кут [41]. Тому необхідно дослідити характеристики таких генераторів, що працюють у складі ДЖЗД.

Розроблено динамічну імітаційну модель ДЖЗД на основі генератора з ВКЗ і зварювальними інверторами, що підключені до клем постійного струму генератора [26]. Надалі слід спрямувати зусилля на розробку більш детальної моделі та широкомасштабні дослідження ДЖЗД із таким АГ.

Розглянуто можливість використання у складі ДЖЗД вентильно-індукторних генераторів [42]. Доцільно виконати порівняння їхніх зварювальних характеристик із такими характеристиками АГ у складі ДЖЗД, розглянути раціональність використання в багатопостових зварювальних системах.

Висновки. Таким чином, у відділі електромеханічних схем Інституту електродинаміки НАН України розвинуто теорію, розроблено принципи побудови й керування, математичні моделі, схемотехнічні рішення й рекомендації із проєктування, проведено комплексні дослідження та визначено напрямки подальших досліджень АГ із блоками формування зварювальної дуги автономних зварювальних мультисистем, що забезпечило створення умов для їхньої розробки та впровадження.

У роботі використано результати досліджень, отримані при виконанні держбюджетних тем «АСИНГЕН» № ГР 0102U007350 і «АСИНГЕН-2» № ДР 0107U002515, а також за підтримки Національного фонду досліджень України (Проєкт «Електромеханічні системи підвищеної енергоефективності для енергетики, технологій і транспорту» № 2023.04/0075).

1. Голошубов В.І. Зварювальні джерела живлення: навчальний посібник. К.: Арістей. 2005. 446 с.
2. Welders/Generators for engine-driven welders with SMAW welding process. URL: <https://www.sogaenergyteam.com/wp-content/uploads/2015/12/WELDERS-RANGE-SINCRO.pdf> (accessed 11.11.2024)
3. Boussiala Boubakr & Nezli L. & Mahmoudi Mohand & Deboucha, i Abdelhakim. Novel welding machine based on small PMSG wind turbine. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*. 2018. DOI: <https://doi.org/10.053304.10.1063/1.5042609> (accessed 11.11.2024)
4. Richard Beeson, Stephen Li, Alan Smith. Engine driven welding power supply with inverter auxiliary power. US Patent US6469401B2, 2002.
5. Welding machine with Honda engine petrol-driven Powerflex Brand. URL: <https://jashsupplies.com/product/welding-machine-with-honda-engine-petrol-driven-powerflex-brand/> (accessed 11.11.2024)
6. R. K. Kumawat, S. Chourasiya, S. Agrawal and D. K. Paliwal. Self Excited Induction Generator: A Review. *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology (IARJET)*. 2015. Vol. 2. No. 1. Pp. 37–42.
7. Varshney L, Vardhan AS, Vardhan AS, Kumar S, Saket RK, Sanjeevikumar P. Performance characteristics and reliability assessment of self-excited induction generator for wind power generation. *IET Renew. Power Gener.* 2021. 15. 1927–1942. <https://doi.org/10.1049/rpg2.12116>
8. B. M. Krishna V. and V. Sandeep, Experimental Study on Different Modes of Self Excited Induction Generator Operation. *2nd PhD Colloquium on Ethically Driven Innovation and Technology for Society (PhD EDITS)*, Bangalore, India, 2020. Pp. 1–2, DOI: <https://doi.org/10.1109/PhDEDITS51180.2020.9315310>
9. P. Nakorn, P. Machot, V. Kinnaree and C. Manop. Study of Three-phase Self-excited Induction Generator Operating as Single-phase Induction Generator Supplying Non-linear Load. *18th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, Chiang Mai, Thailand, 2021. Pp. 806–809. DOI: <https://doi.org/10.1109/ECTI-CON51831.2021.9454845>
10. S. P. Burud, T. B. Patil, U. S. Mirje, S. S. More, G. S. Mane and S. S. Mulik. Requirement of Minimum Capacitor to Build-Up and Maintain the Voltage in Self Excited Induction Generator. *International Conference On Advances in Communication and Computing Technology (ICACCT)*, Sangamner, India, 2018. Pp. 627–632. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICACCT.2018.8529428>
11. A. A. Al-Manfi, W. A. Mohamed and E. F. Elsalhin. Voltage Control of Stand-alone Single Phase Self Excited Induction Generator for Variable Speed Wind Turbine Using Bang Bang-PWM Controller. *IEEE 2nd International Maghreb Meeting of the Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (MI-STA)*, Sabratha, Libya, 2022. Pp. 749–754. DOI: <https://doi.org/10.1109/MI-STA54861.2022.9837503>
12. D. Elshaibani *et al.* Simulation and practical implementation of a SEIG used in wind energy systems with rectified output voltage. *4th IEEE International Conference on Engineering Technologies and Applied Sciences (ICETAS)*, Salmabad, Bahrain, 2017. Pp. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICETAS.2017.8277880>
13. W. E. Vanço, F. B. Silva, C. M. R. De Oliveira, J. R. B. A. Monteiro and J. M. M. De Oliveira. A Proposal of Expansion and Implementation in Isolated Generation Systems Using Self-Excited Induction Generator With Synchronous Generator. *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. Pp. 117188–117195. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2937229>
14. Noriyuki Kimura, Toshimitsu Morizane, Katsunori Taniguchi and Tomoyuki Hamada. Inverter excited induction machine for high performance wind power generation system. *European Conference on Power Electronics and Applications*, Aalborg, Denmark, 2007. Pp. 1–9. DOI: <https://doi.org/10.1109/EPE.2007.4417481>
15. M. Rezkallah, A. Chandra, B. Singh and M. El Kahel. Vector control of squirrel-cage induction generator for stand-alone wind power generation. *IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, Montreal, QC, Canada, 2012. Pp. 1166–1171. DOI: <https://doi.org/10.1109/IECON.2012.6388607>

16. S. Lee and M. Sim. A study on induction generator control methods for commercial vehicle based on slip- and vector control. *20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Sydney, NSW, Australia, 2017. Pp. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICEMS.2017.8056248>
17. S. Peresada, S. Kovbasa, M. Zhelinskyi and A. Duchenko. Speed sensorless direct field oriented control of induction generator. *IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, Kyiv, Ukraine, 2017. Pp. 548–553. DOI: <https://doi.org/10.1109/UKRCON.2017.8100304>
18. S. Yukhalang, T. Sopapirm and V. Kinnares. Three-phase Self-Excited Induction Generator Operating as Single-phase Induction Generator using Static VAR Compensator. *20th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, Nakhon Phanom, Thailand, 2023. Pp. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.1109/ECTI-CON58255.2023.10153314>
19. N. Singla and V. Pahwa. Dynamic performance of three phase self excited induction generator using STATCOM for improved voltage regulation. *2nd International Conference on Recent Advances in Engineering & Computational Sciences (RAECS)*, Chandigarh, India, 2015. Pp. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/RAECS.2015.7453418>
20. Satpathy A.S., Kastha D. and Kishore K. Control of a STATCOM-assisted self-excited induction generator-based WECS feeding non-linear three-phase and single-phase loads. *IET Power Electronics*. 2019. No 12. Pp. 829–839. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-pel.2018.5482>
21. Ion Catalin Petrea and Ioan Serban. Seamless Integration of an Autonomous Induction Generator System into an Inverter-Based Microgrid. *Energies* 12. 2019. No. 4. Pp. 638. DOI: <https://doi.org/10.3390/en12040638>
22. Мазуренко Л.І., Лісник В.Я., Диннік Л.М., Джура О.В. Математична модель і алгоритм керування асинхронного зварювального генератора. *Технічна електродинаміка*. 2008. № 2. С. 22–26.
23. Лищенко А.И., Лесник В.А., Мазуренко Л.И. Автономные источники питания сварочной дуги с асинхронными генераторами. *Технічна електродинаміка*. 1999. № 6. С. 51–55.
24. Мазуренко Л.І., Романенко В.І. Асинхронний генератор з вентильним збудженням як джерело живлення зварювальної дуги. *Технічна електродинаміка*. 2010. № 6. С. 35–39.
25. Мазуренко Л.И., Джура А.В., Дынник Л.Н., Соловьев В.В. Однопостовой автономный сварочный комплекс. Часть 1: Математическая модель силовой части. *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету*. 2009. Вип. 3(56). Ч. 1. С. 145–149.
26. L.I. Mazurenko, O.V. Dzhura, A.V. Kotsiuruba, M.O Shykhnenko. An induction generator based electrical generator set for dual DC ARC welding and AC electric power supply. *IEEE 6th International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*. Kremenchuk, Ukraine. 2024. Pp. 18–21.
27. Мазуренко Л.І., Романенко В.І. Асинхронний вентильний генератор в якості керованого джерела струму. *Вісник Національного технічного університету "ХПИ"*. Харків, Україна. 2010. № 28. С. 66–67.
28. Л.І Мазуренко, В.І. Романенко, Спосіб керування автономним асинхронним генератором з короткозамкненим ротором. Пат. на корисну модель UA № 51704, 2010.
29. Мазуренко Л.І., Джура О.В., Романенко В.І., Білик О.А. Розрахункове дослідження асинхронних генераторів з двома статорними обмотками в складі зварювальних комплексів з широтно-імпульсними регуляторами струму. *Технічна електродинаміка*. 2012. № 3. С. 83–84.
30. Мазуренко Л.И., Лищенко А.И. Асинхронные генераторы с вентильным и вентильно-емкостным возбуждением для автономных энергоустановок. К.: Наук. думка, 2011. 271 с.
31. Мазуренко Л.І., Джура О.В., Диннік Л.М., Соловйов В.В. Моделювання асинхронних генераторів з двома обмотками статора при роботі на випрямляч з РС-навантаженням. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2010. Вип. 25. С. 81–88.
32. Розробити основи теорії, принципи побудови та провести комплексне дослідження багатофункціональних енергоефективних асинхронних генераторів з вентильно-ємнісним збудженням і мікропроцесорним керуванням для автономних зварювальних мультисистем ("Асинген-2"). Заключний звіт про НДР. Ін-т електродинаміки НАН України. № ДР 0107U002515. 2010. 316 с.
33. Мазуренко Л.И., Джура А.В., Дынник Л.Н. Однопостовой автономный сварочный комплекс. Часть 2: Алгоритм управления, результаты моделирования. *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету*. 2009. Вип. 4 (57). Ч. 2. С. 128–132.
34. Провести исследования электромагнитных процессов и разработать принципы моделирования автономных источников питания сварочной дуги на основе асинхронных генераторов с вентильными преобразователями в цепях статора ("АСИНГЕН"). Заключительный отчет о НИР. Ін-т електродинаміки НАН України. № ГР 0102U007350. 2006.
35. Мазуренко Л.І., Романенко В.І. Математична модель асинхронного генератора з вентильним збудженням з використанням методу припасовування. *Технічна електродинаміка*. 2010. № 4. С. 19–24.
36. Лесник В.А., Мазуренко Л.И. Многопостовые источники питания сварочной дуги на основе асинхронных генераторов. *Технічна електродинаміка*. Тем. выпуск "Проблеми сучасної електромеханіки". 2000. Ч. 2. С. 76–81.

37. Мазуренко Л.І., Романенко В.І., Джура О.В. Дослідження статичних характеристик автономного асинхронного зварювального генератора з вентильним збудженням по Г-подібній схемі заміщення. *Технічна електродинаміка*. 2012. № 2. С. 75–76.
38. Мазуренко Л.І., Романенко В.І., Джура О.В. Розрахунок робочих характеристик автономного зварювального генератора з вентильним збудженням за схемою заміщення. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2011. Вип. 28. С. 64–70.
39. Мазуренко Л.І., Романенко В.І., Джура О.В. Передаточна функція автономного асинхронного генератора з вентильним збудженням. *Електромеханічні та енергозберігаючі системи*. Тем. випуск "Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика" науково-виробничого журналу. 2012. Вип. 3(19). С. 412–415.
40. Мазуренко Л.І., Лісник В.Я. Автономні джерела живлення зварювальної дуги на основі асинхронного генератора. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2006. № 2 (14). С. 174–176.
41. Мазуренко, Л.І., Василів К.М., Джура О.В. Вдосконалена математична модель триобмоткової асинхронної машини. *Технічна електродинаміка*. 2023. № 5. С. 28–36.
42. Шихненко М.О., Ярас Я. Автономні вентильно-індукторні зварювальні генератори. *International Scientific-Practical Conference of young scientists "Build-Master-Class-2024"*. September 2024. Kyiv. Ukraine.

ASYNCHRONOUS GENERATORS IN AUTONOMOUS POWER SOURCES FOR WELDING ARC. STATE AND PROSPECTS

L.I. Mazurenko, O.V. Dzhura, M.O. Shykhnenko, O.A. Bilyk

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,

Beresteytsky Ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine

e-mail: mlins@ied.org.ua

The article is aimed at generalizing the results of the study of asynchronous generators (AG) of autonomous welding arc power sources (AWPS) obtained in the Department of Electromechanical Systems of the Institute of Electrodynamics of the NASU. The proposed classification of AG of autonomous welding systems is considered, mathematical models are developed, the results of computational and experimental studies of such systems with AG with capacitor excitation and an uncontrolled rectifier, in the DC circuit of which high-frequency inverters, pulse-width regulators or half-bridge inverters are connected, as well as generators with valve and valve-capacitor excitation. The design features and experimental samples of welding arc power sources with AG are considered. The directions of further research are determined. Ref. 42, fig. 5.

Keywords: welding arc power source; asynchronous generator; capacitor, valve, valve-capacitor excitation; half-bridge and high-frequency inverters; pulse width regulator; mathematical model; computational and experimental studies.

1. Holoshubov V.I. Welding power sources: tutorial. K.: Aristeus. 2005. 446 p. (Ukr)
2. Welders/Generators for engine-driven welders with SMAW welding process. URL: <https://www.sogaenergyteam.com/wp-content/uploads/2015/12/WELDERS-RANGE-SINCRO.pdf> (accessed 11.11.2024)
3. Boussiala, Boubakr & Nezli, L. & Mahmoudi, Mohand & Deboucha, Abdelhakim. Novel welding machine based on small PMSG wind turbine. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*. 2018. DOI: <https://doi.org/10.053304.10.1063/1.5042609>. (accessed 11.11.2024)
4. Richard Beeson, Stephen Li, Alan Smith. Engine driven welding power supply with inverter auxiliary power. US Patent US6469401B2, 2002.
5. Welding machine with Honda engine petrol-driven Powerflex Brand. URL: <https://jashsupplies.com/product/welding-machine-with-honda-engine-petrol-driven-powerflex-brand/> (accessed 11.11.2024)
6. R. K. Kumawat, S. Chourasiya, S. Agrawal and D. K. Paliwalia. Self Excited Induction Generator: A Review. *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology (IARJSET)*. 2015. Vol. 2. No. 1. Pp. 37–42.
7. Varshney L, Vardhan AS, Vardhan AS, Kumar S, Saket RK, Sanjeevikumar P. Performance characteristics and reliability assessment of self-excited induction generator for wind power generation. *IET Renew. Power Gener.* 2021. No 15. Pp. 1927–1942. <https://doi.org/10.1049/rpg2.12116>.
8. B. M. Krishna V. and V. Sandeep, Experimental Study on Different Modes of Self Excited Induction Generator Operation. *2nd PhD Colloquium on Ethically Driven Innovation and Technology for Society (PhD EDITS)*, Bangalore, India, 2020. Pp. 1–2. DOI: <https://doi.org/10.1109/PhDEDITS51180.2020.9315310>
9. P. Nakorn, P. Machot, V. Kinnares and C. Manop. Study of Three-phase Self-excited Induction Generator Operating as Single-phase Induction Generator Supplying Non-linear Load. *18th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, Chiang Mai, Thailand, 2021. Pp. 806–809. DOI: <https://doi.org/10.1109/ECTI-CON51831.2021.9454845>

10. S. P. Burud, T. B. Patil, U. S. Mirje, S. S. More, G. S. Mane and S. S. Mulik. Requirement of Minimum Capacitor to Build-Up and Maintain the Voltage in Self Excited Induction Generator. *International Conference On Advances in Communication and Computing Technology (ICACCT)*, Sangamner, India, 2018. Pp. 627–632. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICACCT.2018.8529428>
11. A. A. Al-Manfi, W. A. Mohamed and E. F. Elsalhin. Voltage Control of Stand-alone Single Phase Self Excited Induction Generator for Variable Speed Wind Turbine Using Bang Bang-PWM Controller. *IEEE 2nd International Maghreb Meeting of the Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (MI-STA)*, Sabratha, Libya, 2022. Pp. 749–754. DOI: <https://doi.org/10.1109/MI-STA54861.2022.9837503>
12. D. Elshaibani *et al.* Simulation and practical implementation of a SEIG used in wind energy systems with rectified output voltage. *4th IEEE International Conference on Engineering Technologies and Applied Sciences (ICETAS)*, Salmabad, Bahrain, 2017. Pp. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICETAS.2017.8277880>
13. W. E. Vanço, F. B. Silva, C. M. R. De Oliveira, J. R. B. A. Monteiro and J. M. M. De Oliveira. A Proposal of Expansion and Implementation in Isolated Generation Systems Using Self-Excited Induction Generator With Synchronous Generator. *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. Pp. 117188–117195. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2937229>
14. Noriyuki Kimura, Toshimitsu Morizane, Katsunori Taniguchi and Tomoyuki Hamada. Inverter excited induction machine for high performance wind power generation system. *European Conference on Power Electronics and Applications*, Aalborg, Denmark, 2007. Pp. 1–9. DOI: <https://doi.org/10.1109/EPE.2007.4417481>
15. M. Rezkallah, A. Chandra, B. Singh and M. El Kahel. Vector control of squirrel-cage induction generator for stand-alone wind power generation. *IECON 2012. 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, Montreal, QC, Canada, 2012. Pp. 1166–1171. DOI: <https://doi.org/10.1109/IECON.2012.6388607>
16. S. Lee and M. Sim. A study on induction generator control methods for commercial vehicle based on slip- and vector control. *20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Sydney, NSW, Australia, 2017. Pp. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICEMS.2017.8056248>
17. S. Peresada, S. Kovbasa, M. Zhelinskyi and A. Duchenko, Speed sensorless direct field oriented control of induction generator. *IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, Kyiv, Ukraine, 2017. Pp. 548–553. DOI: <https://doi.org/10.1109/UKRCON.2017.8100304>
18. S. Yukhalang, T. Sopapirm and V. Kinnarees. Three-phase Self-Excited Induction Generator Operating as Single-phase Induction Generator using Static VAR Compensator. *20th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, Nakhon Phanom, Thailand, 2023. Pp. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.1109/ECTI-CON58255.2023.10153314>
19. N. Singla and V. Pahwa. Dynamic performance of three phase self excited induction generator using STATCOM for improved voltage regulation. *2nd International Conference on Recent Advances in Engineering & Computational Sciences (RAECS)*, Chandigarh, India, 2015. Pp. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/RAECS.2015.7453418>
20. Satpathy, A.S., Kastha, D. and Kishore, K. Control of a STATCOM-assisted self-excited induction generator-based WECS feeding non-linear three-phase and single-phase loads. *IET Power Electronics*. 2019. No 12. Pp. 829–839. <https://doi.org/10.1049/iet-pel.2018.5482>
21. Ion Catalin Petrea, and Ioan Serban. Seamless Integration of an Autonomous Induction Generator System into an Inverter-Based Microgrid. *Energies* 12.. 2019. No. 4. P. 638. <https://doi.org/10.3390/en12040638>
22. Mazurenko L.I., Lisnyk V.Ya., Dynnik L.M., Dzhura O.V. Mathematical model and control algorithm of an asynchronous welding generator. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2008. No. 2. Pp. 22–26. (Ukr)
23. Lishchenko A.I., Lesnik V.A., Mazurenko L.I. Autonomous power sources for welding arc with asynchronous generators. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 1999. No. 6. Pp. 51–55. (Rus)
24. Mazurenko L.I., Romanenko V.I. An asynchronous generator with valve excitation as a source of life for the welding arc. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2010. No. 6. Pp. 35–39. (Ukr)
25. Mazurenko L.I., Dzhura A.V., Dynnik L.N., Soloviev V.V. Single-post autonomous welding complex. Part 1: Mathematical model of the power section. *News of Kremenchuk State Polytechnical University*. 2009. Issue 3(56). Part 1. Pp. 145–149. (Rus)
26. L.I. Mazurenko, O.V. Dzhura, A.V. Kotsiuruba, M.O Shykhnenko. An induction generator based electrical generator set for dual DC ARC welding and AC electric power supply. *IEEE 6th International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*. Kremenchuk, Ukraine. 18-21 September 2024.
27. Mazurenko L.I., Romanenko V.I. Asynchronous valve generator in the core of a cerated dzherel struma. *Newsletter of the National Technical University KhPI*. 2010. No. 28. Pp. 66–67. (Ukr)
28. L.I. Mazurenko, V.I. Romanenko, Method of controlling an autonomous asynchronous generator with a squirrel-cage rotor. Patent for utility model UA No. 51704, 2010. (Ukr)
29. Mazurenko L.I., Dzhura O.V., Romanenko V.I., Bilyk O.A. Computational study of asynchronous generators with two stator windings as part of welding complexes with pulse-width current regulators. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2012. No. 3. Pp. 83–84. (Ukr)
30. Mazurenko L.I., Lishchenko A.I. Asynchronous generators with valve and valve-capacitive excitation for autonomous power plants. K.: Nauk. dumka, 2011. 271 p. (Rus)

31. Mazurenko L.I., Dzhura O.V., Dynnik L.M., Solovyov V.V. Modeling of asynchronous generators with two stator windings when operating on a rectifier with RC-load. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky Nationalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2010. Issue 25. Pp. 81–88. (Ukr)
32. To develop the foundations of the theory, principles of construction and conduct a comprehensive study of multifunctional energy-efficient asynchronous generators with valve-capacitive excitation and microprocessor control for autonomous welding multisystems (ASINGEN-2). Final report on the research. Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine. No. DR 0107U002515. 2010. 316 p. (Ukr)
33. Mazurenko L.I., Dzhura A.V., Dynnik L.N. Single-station autonomous welding complex. Part 2: Control algorithm, simulation results. *Newsletter of the Kremenchuk State Polytechnic University*. 2009. No 4 (57). Part 2. Pp. 128–132. (Rus)
34. Conduct research into electromagnetic processes and develop principles for modeling autonomous power sources for a welding arc based on asynchronous generators with valve converters in stator circuits (ASINGEN). Final report on research. Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine. No. GR 0102U007350. 2006. (Rus)
35. Mazurenko L.I., Romanenko V.I. A mathematical model of an asynchronous generator with valve excitation and a vicoristan method of adaptation. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2010. No. 4. Pp. 19–24. (Ukr)
36. Lesnik V.A., Mazurenko L.I. Multi-station welding arc power sources based on asynchronous generators. *Tekhnichna Elektrodynamika*. Tem. issue of Problems of daily electrical mechanics. 2000. Part 2. Pp. 76–81. (Rus)
37. Mazurenko L.I., Romanenko V.I., Dzhura O.V. Investigation of static characteristics of an autonomous asynchronous welding generator with valve excitation using an L-shaped equivalent circuit. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2012. No. 2. Pp. 75–76. (Ukr)
38. Mazurenko L.I., Romanenko V.I., Dzhura O.V. Calculation of the operating characteristics of an autonomous welding generator with valve excitation using the equivalent circuit. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky Nationalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2011. Issue 28. Pp. 64–70. (Ukr)
39. Mazurenko L.I., Romanenko V.I., Dzhura O.V. Transfer function of an autonomous asynchronous generator with valve excitation. *Electromechanical and energy-saving systems*. Thematic issue Problems of automated electric drive. Theory and practice of the scientific and production journal. Kremenchuk. 2012. Issue 3(19). Pp. 412–415. (Ukr)
40. Mazurenko L.I., Lisnyk V.Ya. Autonomous power sources for welding arcs based on an asynchronous generator. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky Nationalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2006. No. 2 (14). Pp. 174–176. (Ukr)
41. Mazurenko, L.I., Vasylyv K.M., Dzhura O.V. Improved mathematical model of a three-winding induction machine. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2023. No. 5. Pp. 28–36. (Ukr)
42. Shykhnenko M.O., Yaras Y. Autonomous valve-inductor welding generators. *International Scientific-Practical Conference of young scientists Build-Master-Class-2024*. September 2024. Kyiv, Ukraine. (Ukr)

Надійшла: 13.11.2024

Прийнята: 21.11.2024

Submitted: 13.11.2024

Accepted: 21.11.2024

УДК 621.313.8

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2024.69.095>

ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ БЕЗКОНТАКТНОГО ДВИГУНА З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ ПРИ ШИРОТНО-ІМПУЛЬСНОМУ ЖИВЛЕННІ

К.П. Акинін*, докт. техн. наук, **В.Г. Кіреєв****, канд. техн. наук, **І.С.Петухов*****, докт. техн. наук, **А.А. Філоменко******, канд. техн. наук
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна
e-mail: kvg2016@ukr.net

Статтю присвячено дослідженню характеристик та режимів роботи безконтактного двигуна з постійними магнітами у структурі електроприводу із двопровідним зовнішнім живленням від джерела напруги із широтно-імпульсним регулюванням. Наведено залежності частоти обертання, діючого значення статорного струму та середнього значення струму у ланці постійного струму інвертора напруги, а також залежності коефіцієнта моменту від середньої величини моменту двигуна. Проведено дослідження впливу частоти напруги живлення на режими роботи двигуна. Досліджено режими обмеження струму та моменту двигуна в системі з однопозиційним релейним регулятором та формувачем фіксованого інтервалу відключення транзисторів. Бібл. 12, рис. 16.

Ключові слова: безконтактний двигун з постійними магнітами, мостовий інвертор напруги, широтно-імпульсне регулювання, електромеханічна характеристика.

Через об'єктивні причини протягом тривалого часу при побудові автоматизованих електромеханічних приладів і систем як виконавчі ланки й до теперішнього часу використовуються колекторні двигуни постійного струму [1, 2]. Такі двигуни є найбільш простими при їх застосуванні, оскільки при цьому не потрібне використання складних напівпровідникових перетворювачів, а управління здійснюється шляхом регулювання постійної напруги живлення та зміни її полярності для реалізації реверсу двигуна. Недоліки колекторних двигунів очевидні та обумовлені наявністю механічних контактів на роторі, що обертається.

У той же час протягом останніх десятиліть завдяки своїм перевагам в електромеханічних системах широко використовуються безконтактні двигуни (БДПМ) з постійними магнітами на роторі [3-5].

Однією із задач при побудові електромеханічних систем є необхідність побудови безконтактного конструктивного та функціонального аналога колекторного двигуна постійного струму на основі електроприводу з БДПМ для реверсивного управління кутовою швидкістю обертання ротора за допомогою двох вхідних провідників живлення. Використання такої структури електроприводу дозволяє зробити заміну вже діючого колекторного двигуна на безконтактний без зміни загальної структури схеми живлення та управління автоматизованої електромеханічної системи.

Структури електроприводів на основі БДПМ з двопровідним живленням та управлінням були запропоновані у [6-8]. Вони подібні до структур електроприводів змінного струму, побудованих на основі дволанкових перетворювачів частоти з вхідним випрямлячем мережевої змінної напруги та вихідним інвертором напруги [9]. У цій задачі побудови електроприводу використовується живлення його схеми від джерела постійної напруги за допомогою двох вхідних провідників, де випрямляч здійснює випрямлення вхідної напруги, яка подається на вхід інвертора.

Метою статті є дослідження статичних електромеханічних характеристик і режимів роботи БДПМ у структурі електроприводу з двопровідним управлінням при широтно-імпульсному живленні від зовнішнього джерела. Такий електропривод призначений для використання його як виконавчого елемента в автоматизованих електромеханічних системах.



Основні матеріали та результати досліджень. Структура електроприводу на основі БДПМ [6] представлена на рис. 1, де ДЖ – зовнішнє джерело живлення постійного струму з вихідною імпульсною напругою, при цьому імпульси напруги мають прямокутну форму, а регулювання середньої величини напруги здійснюється шляхом зміни шпаруватості послідовності імпульсів; МВ – мостовий випрямляч; Д – датчик струму; ІН – трифазний мостовий інвертор напруги; СК – система керування електроприводом; ДПР – датчик положення ротора; U_1 – сигнал для визначення полярності вхідної напруги та завдання напрямку обертання двигуна, що вимірюється відносно точки ланки постійного струму з меншим потенціалом; U_2 – сигнал напруги у ланці постійного струму; U_s – напруга на виході зовнішнього джерела живлення з широтно-імпульсним регулюванням. При цьому всі елементи електроприводу – випрямляч, інвертор напруги, система керування, датчик положення ротора та виконавчий безконтактний двигун – конструктивно об'єднуються в єдиному корпусі. І в такому випадку реверсивне регулювання кутової швидкості двигуна здійснюється за двома провідниками, що з'єднують джерело живлення зі схемою електроприводу. А в результаті маємо безконтактний конструктивний та функціональний аналог колекторного двигуна постійного струму.

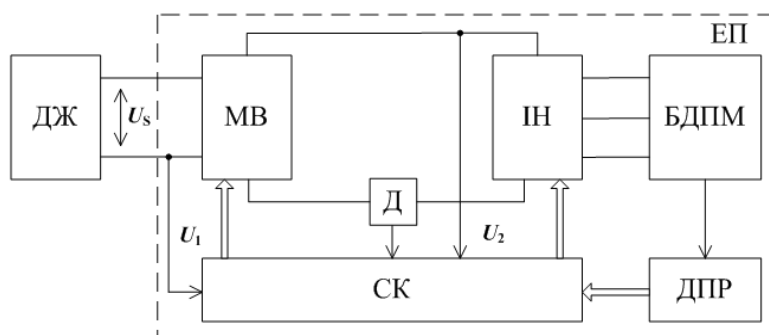


Рис. 1. Загальна структура електроприводу на основі БДПМ

У структурі (рис. 1) мостовий випрямляч може бути виконаний на основі чотирьох діодів Шотки або MOSFETs. В останньому випадку залежно від полярності напруги, що подається з виходу зовнішнього джерела живлення, відповідно до відкритої пари діодів в діагоналі моста випрямляча включається пара транзисторів. Можливість використання MOSFETs як силових ключів випрямляча для комутації напруги в даній

схемі базується на відомому явищі протікання струму через канал включеного напівпровідникового приладу у двох напрямках – від стоку до витoku та навпаки [10]. Падіння напруги на вентилях некерованого випрямляча, навіть якщо вони виконані на базі діодів Шотки, відносно великі. Тому для систем з низьким рівнем напруги живлення, наприклад до 30 В, доцільною є реалізація активного однофазного мостового випрямляча на базі MOSFETs. Така можливість розглянута в [11] для зменшення втрат у силових ключах випрямляча змінної напруги.

Залежно від полярності вихідної напруги джерела живлення та величини сигналу U_1 змінюється послідовність сигналів комутації транзисторів інвертора напруги та таким чином здійснюється реверс безконтактного двигуна. Сигнали з виходу датчика струму та сигнал напруги u_2 використовуються для контролю стану електроприводу та двигуна.

Оскільки одна задана полярність імпульсів напруги джерела живлення зберігається протягом відносно тривалого часу (що багаторазово перевищує величину періоду змінної напруги статорних обмоток двигуна), для даного дослідження ми представляємо розрахункову схему електроприводу (рис. 2), на якій мостовий випрямляч замінено резистором R_2 . Розмір його опору дорівнює сумі опорів двох відкритих MOSFETs. Крім того, на рис. 2 показаний трифазний мостовий інвертор напруги на основі шести MOSFETs n-типу провідності, симетрична трифазна R - L - e ланка статорних обмоток двигуна, а датчик струму представлений резистором R_s . Подання статорних обмоток БДПМ трифазною R - L - e ланкою справедливо та припустимо для безпазової конструкції статора при поверхневому встановленні постійних магнітів на роторі [9].

Напруга на виході зовнішнього джерела живлення є послідовністю прямокутних імпульсів напруги з амплітудою U_s , постійною частотою f_s та регульованою шпаруватістю γ .

Припускаючи, що статор двигуна є симетричним, три ЕРС статорної обмотки описуються виразами

$$e_A = k_m \omega \sin \theta; \quad (1)$$

$$e_B = k_m \omega \sin(\theta - 2\pi/3); \quad (2)$$

$$e_C = k_m \omega \sin(\theta - 4\pi/3); \quad (3)$$

де k_m , ω – постійний коефіцієнт і кутова швидкість обертання ротора двигуна; θ – електричний кут повороту валу ротора, що визначається як $\theta = p\omega t$, де p – число пар полюсів ротора; t – час.

У цій статті розглядається безпазовий БДПМ, який розробляється в даний час і призначений для використання як виконавчого елемента в автоматизованих електромеханічних системах. Двигун має такі основні параметри:

- номінальна потужність – 180 Вт;
- максимальна швидкість обертання на холостому ході – 4000 об/хв;
- номінальна швидкість обертання – 3000 об/хв;
- номінальний момент – 0,57 Нм;
- число пар полюсів – 1;
- номінальна напруга живлення електроприводу – 27 В.

Крім того, двигун і схема, зображені на рис. 2, характеризуються такими параметрами: $k_m = 0,06446$ Вс, $L_{11} = L_{12} = L_{13} = 2,27 \cdot 10^{-5}$ Гн, $R_{11} = R_{12} = R_{13} = 0,05$ Ом, $R_2 = 0,0034$ Ом. Частота комутації в даному дослідженні варіюється в діапазоні від 4 до 20 кГц.

Для оцінки режимів роботи БДПМ використовуватимемо такі показники:

M_{av} – середня величина моменту двигуна, при цьому миттєва величина моменту двигуна визначається за формулою

$$M = (i_A e_A + i_B e_B + i_C e_C) / \omega; \quad (4)$$

i_A, i_B, i_C – струми в обмотках статора; I_{av} – середня величина струму у ланці постійного струму електроприводу; I_{ef} – діюче значення струму у фазі статорної обмотки двигуна; k_{m2} – коефіцієнт моменту двигуна, що визначається за формулою як відношення середніх значень моменту та струму

$$k_{m2} = M_{av} / I_{av}. \quad (5)$$

Комутація мостового інвертора напруги здійснюється відповідно до алгоритму перемикання шести транзисторів при кутовій протяжності станів їхньої провід-

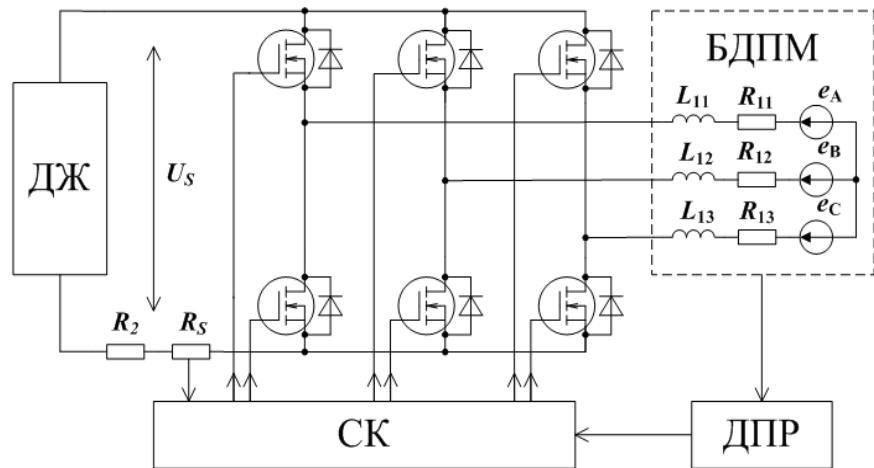


Рис. 2. Розрахункова схема електроприводу на основі БДПМ

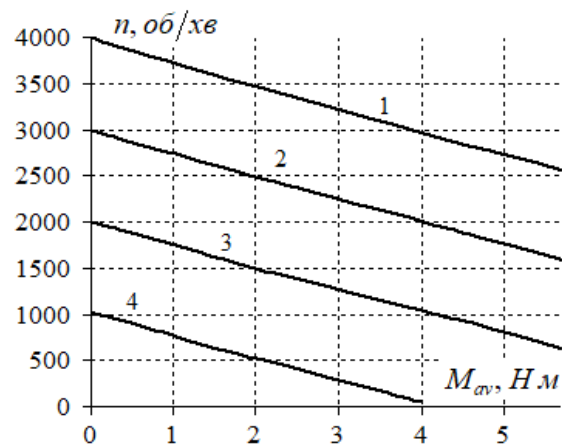


Рис. 3. Механічні характеристики $n(M_{av})$ БДПМ при $f_s = 10$ кГц та шпаруватості γ – 1; 0,75; 0,5 та 0,25

ності на інтервалах 120 електричних градусів [4, 5, 8].

Для моделювання схеми (рис. 2) використано програмне середовище Micro-Cap 12. Далі при розрахунках статичних характеристик задаються швидкість двигуна та шпаруватість джерела живлення.

На рис. 3 показано графіки механічних характеристик двигуна як залежності швидкості обертання n валу двигуна від середньої величини його моменту M_{av} при чотирьох значеннях шпаруватості послідовності прямокутних імпульсів напруги живлення γ – 1; 0,75; 0,5 та 0,25, які позначені на рисунку цифрами від 1 до 4 відповідно.

На рис. 4 показано графіки електромеханічних характеристик двигуна як залежності діючого значення струму I_{ef} у фазі статорної обмотки двигуна та середньої величини струму I_{av} у ланці постійного струму від середньої величини моменту M_{av} . Тут можна зауважити, що криві графіків струмів I_{ef} і I_{av} при різних значеннях шпаруватості γ на малюнках практично не розрізняються.

І, нарешті, на рис. 5 показано графіки залежностей розрахункової величини коефіцієнта моменту двигуна k_{m2} . Аналіз цих залежностей показав середнє, максимальне та мінімальне значення цього коефіцієнта – 0,06514; 0,06719 та 0,06285 Нм/А. У такому випадку можна розрахувати відносні значення відхилень значень цього коефіцієнта від його середнього значення – +3,147% і -3,515%. На рис. 5 і далі є такі ж позначки «1, 2, 3, 4», як і на рис. 3.

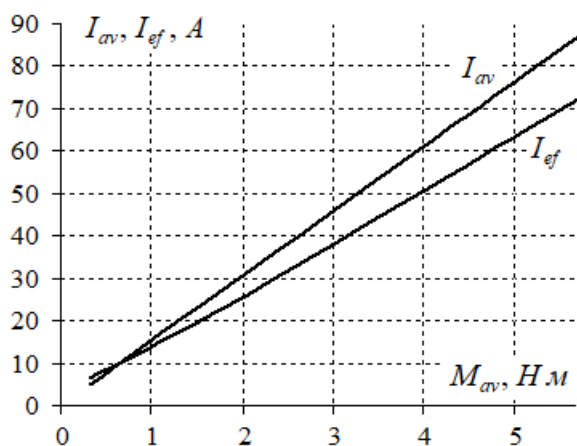


Рис. 4. Залежності діючого значення струму I_{ef} та середньої величини струму I_{av} у ланці постійного струму від середньої величини моменту M_{av} при $f_s=10$ кГц

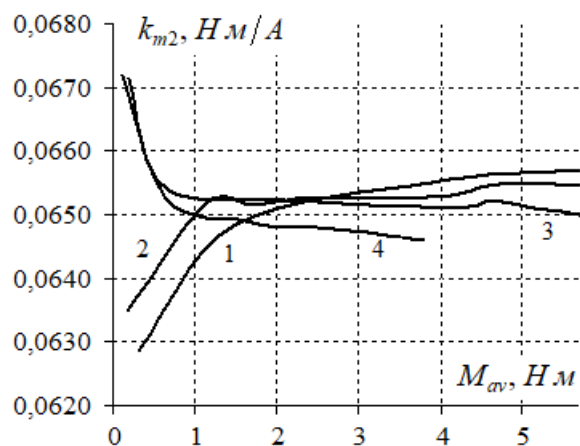


Рис. 5. Залежності величини коефіцієнта k_{m2} від середньої величини моменту M_{av} при $f_s=10$ кГц

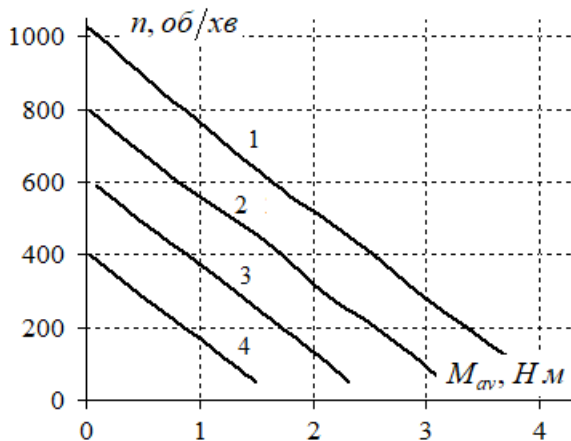


Рис. 6. Механічні характеристики $n(M_{av})$ при $f_s=10$ кГц та шпаруватості γ – 0,25; 0,2; 0,15 та 0,1

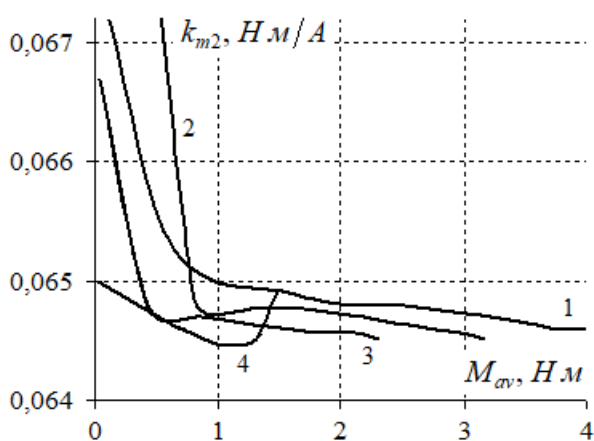


Рис. 7. Залежності величини коефіцієнта k_{m2} від середньої величини моменту M_{av} при $f_s=10$ кГц

Розрахунки (рис. 3-5) були виконані при частоті послідовності імпульсів напруги джерела живлення $f_s = 10 \text{ кГц}$.

На рис. 6 показано графіки механічних характеристик двигуна $n(M_{av})$ при чотирьох значеннях шпаруватості $\gamma - 0,25; 0,2; 0,15$ та $0,1$, які позначені на рисунку цифрами від 1 до 4 відповідно. На рис. 7 показано графіки залежностей розрахункової величини коефіцієнта моменту $k_{m2}(M_{av})$ при тих самих значеннях шпаруватості.

На рис. 8 і 10 показано графіки електромеханічних характеристик двигуна $I_{ef}(M_{av})$ та $I_{av}(M_{av})$, які були отримані при значеннях частоти f_s послідовності імпульсів напруги живлення 20 та 4 кГц відповідно. На рис. 9 і 11 показано графіки залежностей розрахункової величини коефіцієнта моменту двигуна $k_{m2}(M_{av})$ відповідно за тих же двох значень частоти.

Залежності, зображені на рис. 9–11, були отримані при одному значенні шпаруватості $\gamma = 0,5$. Аналіз залежності (рис. 9) показав середнє, максимальне та мінімальне значення цього коефіцієнта – 0,065038; 0,065175 та 0,0647 Нм/А . При цьому відносні значення відхилень значень коефіцієнта від його середнього значення – +0,2106% і -0,0338%. Очевидно, що крива на рис. 11 значно відхиляється від свого середнього значення в області малих значень моменту, а режим роботи БДПМ водночас характеризується гіршими показниками (рис. 10).

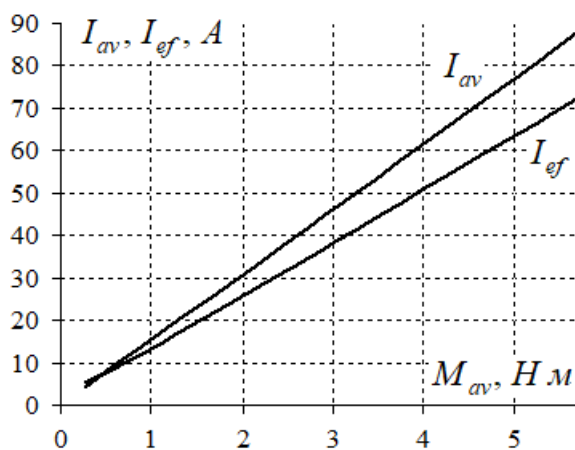


Рис. 8. Залежності діючого значення струму I_{ef} та середньої величини струму I_{av} у ланці постійного струму від середньої величини моменту M_{av} при $f_s = 20 \text{ кГц}$

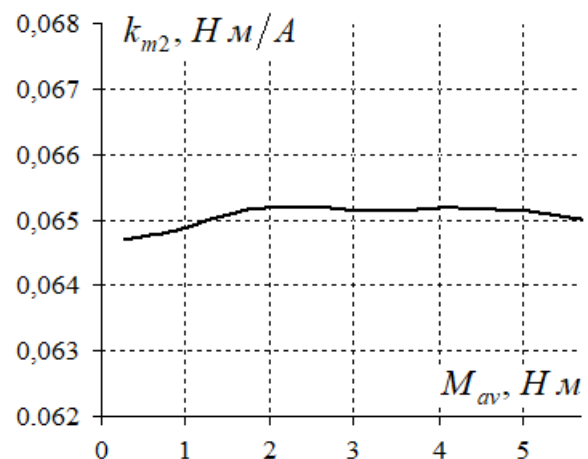


Рис. 9. Залежність величини коефіцієнта k_{m2} від середньої величини моменту M_{av} при $f_s = 20 \text{ кГц}$

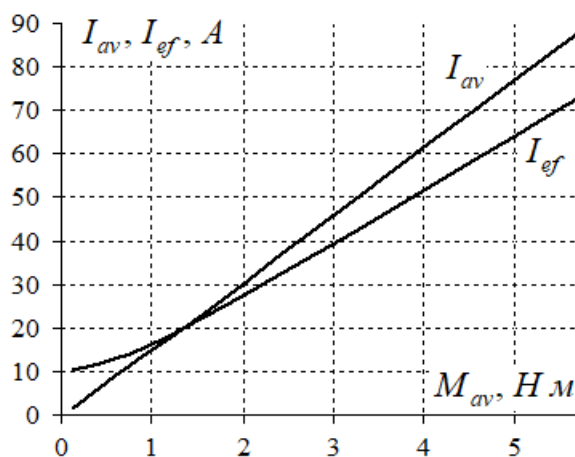


Рис. 10. Залежності діючого значення струму I_{ef} та середньої величини струму I_{av} у ланці постійного струму від середньої величини моменту M_{av} при $f_s = 4 \text{ кГц}$

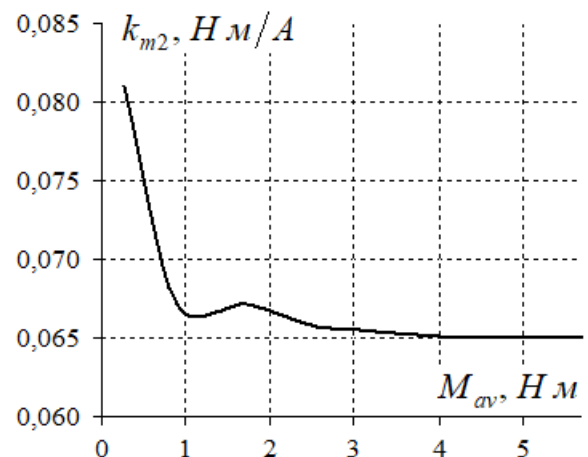


Рис. 11. Залежність величини коефіцієнта k_{m2} від середньої величини моменту M_{av} при $f_s = 4 \text{ кГц}$

Для ілюстрації електромагнітних процесів на рис. 12 представлено розраховані криві трьох фазних ЕРС статора e_A , e_B та e_C , струму i_A статорної обмотки фази А та миттєвої величини моменту двигуна M , розрахованого за формулою (4). Ці криві одержано за умов $n = 2000 \text{ об/хв}$ і $M_{av} = 1 \text{ Нм}$, при цьому $I_{ef} = 13,83 \text{ А}$ та $\gamma = 0,565$.

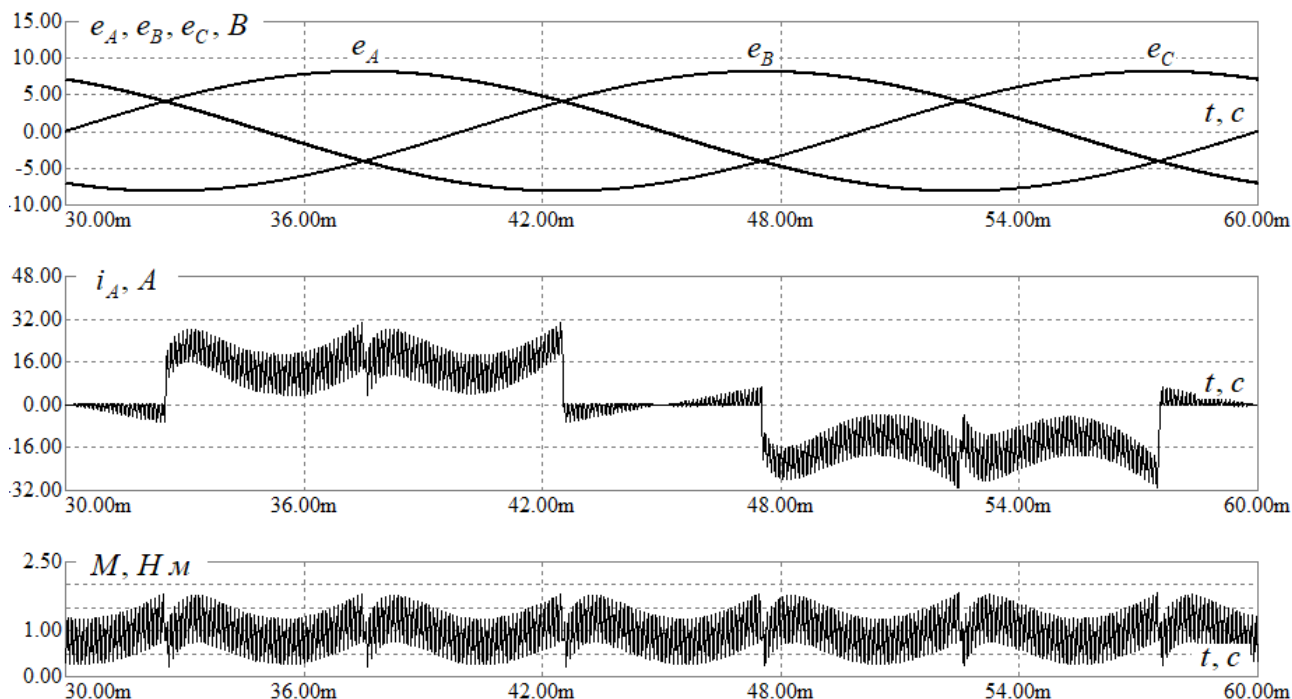


Рис. 12. Фазні ЕРС статора e_A , e_B та e_C , струм i_A статорної обмотки та миттєва величина моменту двигуна M при $f_s = 10 \text{ кГц}$

Для оцінки збільшення діючої величини фазного струму статора внаслідок впливу пульсацій сигналу ЕРС у ланці постійного струму інвертора напруги та дискретного алгоритму комутації інвертора напруги (рис.12), а також імпульсного характеру вихідної напруги джерела живлення на рис. 13 показана крива залежності діючого значення струму статора I_{ef} від частоти f_s за умов $\gamma = 0,5$ і $M_{av} = 0$. Очевидно, що в ідеальному випадку синусоїдального живлення діюче значення струму статора двигуна практично дорівнювало б нулю. Однак у нашому випадку (рис. 13), в області частот, близьких до 20 кГц , ми спостерігаємо вплив дискретної комутації транзисторів інвертора напруги та пульсацій ЕРС статора. А в міру зменшення значення частоти f_s джерела живлення величина діючого значення струму

збільшується внаслідок зростання розмаху пульсацій струму у ланці постійного струму.

У цій статті розглядається також режим обмеження моменту двигуна в замкненій системі з однопозиційним релейним регулятором струму в ланці постійного струму інвертора напруги подібно до того, як це описано в [8], але тільки з формувачем фіксованої безструмової паузи [12]. У такому разі після досягнення струмом максимального заданого значення релейний регулятор змінює свій стан, а на виході формувача імпульсів з'являється логічний сигнал фіксованої тривалості, який вимикає нижню групу транзисторів мостового інвертора. У результаті протягом цього часу струм в обмотці двигуна

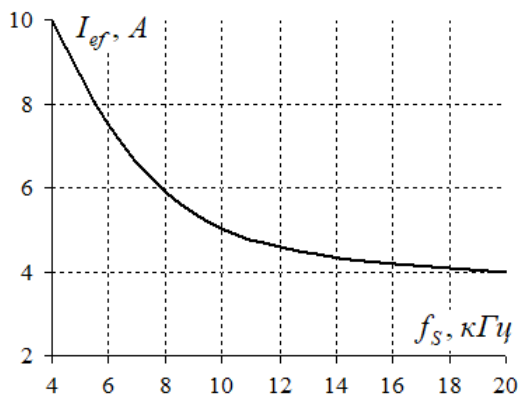


Рис. 13. Залежність діючого значення струму статора I_{ef} від частоти імпульсів f_s напруги живлення за умов $\gamma = 0,5$ і $M_{av} = 0$

зменшується та потім знову починає збільшуватися. І такий процес обмеження струму продовжується періодично. Таким чином, контролюється тільки максимальний заданий рівень струму у ланці постійного струму, після досягнення якого струм починає спадати протягом заданого часу T_{off} . Така структура системи обмеження струму двигуна проста та підходить для тих випадків, коли не потрібна висока точність обмеження моменту та використовується не для реалізації основного режиму роботи, а лише для захисту двигуна від перевантаження.

На рис. 14 показано графіки механічних характеристик двигуна $n(M_{av})$ при шпаруватості $\gamma = 1$ та трьох заданих значеннях максимального струму обмеження – 20, 40 та 80 Ампер. Безперервними та пунктирними лініями зображені відповідно механічні характеристики при тривалості часу відключення транзисторів $T_{off} = 4 \cdot 10^{-5}$ і $2 \cdot 10^{-5}$ секунд.

Для оцінки зміни величини діючого значення струму статора на рис. 15 показано залежності відносного показника k_{m3} від середньої величини моменту двигуна, при цьому запропонований показник визначається за формулою $k_{m3} = I_{ef} / M_{av}$. На рисунку видно, що усі криві цих залежностей практично зливаються, а на ділянках обмеження моменту ця величина відносно стабільна.

При порівнянні основного режиму живлення електроприводу імпульсною напругою та режиму обмеження моменту та струму можна відзначити, що в першому випадку струм у ланці постійного струму інвертора напруги протікає безперервно, а при вимиканні нижньої групи транзисторів при обмеженні моменту струм замикається в колі, що утворюється зі статорних обмоток та транзисторів інвертора напруги, проте в ланку постійного струму він не потрапляє. Останньою обставиною пояснюється вибір однопозиційного релейного регулятора для контролю тільки максимального рівня струму в ланці постійного струму. При цьому нахил моментних ділянок механічних характеристик (рис. 14) може бути відкоригований шляхом відповідного впливу на максимальний рівень струму обмеження.

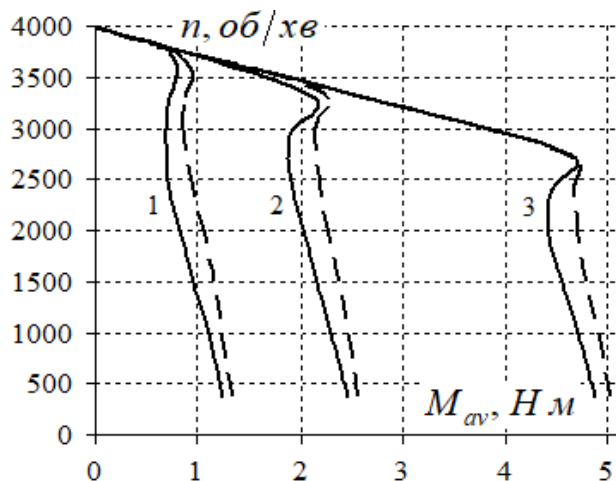


Рис. 14. Механічні характеристики $n(M_{av})$ при трьох заданих значеннях максимального струму обмеження – 20 (1), 40 (2) та 80 (3) А

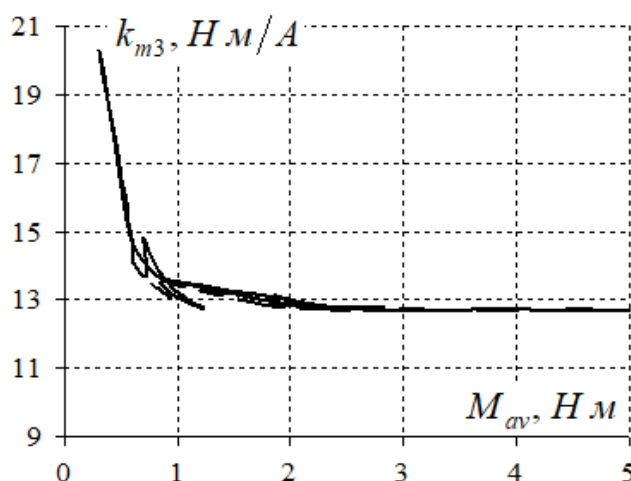


Рис. 15. Залежність відносного показника $k_{m3} = I_{ef} / M_{av}$ від середньої величини моменту M_{av}

На рис. 16 а і б представлено залежності частоти f_R перемикання релейного регулятора від швидкості обертання n валу двигуна відповідно до шести характеристик (рис. 14), причому рис. 16 а відповідає характеристикам, розрахованим при $T_{off} = 4 \cdot 10^{-5}$ с, а рис. 16 б – при $T_{off} = 2 \cdot 10^{-5}$ с. Природно, що чим більше струм обмеження, тим менше частота f_R . Характеристики на малюнках, які розташовані вище, відповідають моментним механічним характеристикам з меншими значеннями струму обмеження. А те, що ці характеристики в зоні

великих значень швидкості обертання n перериваються, означає, що режим обмеження струму припиняється.

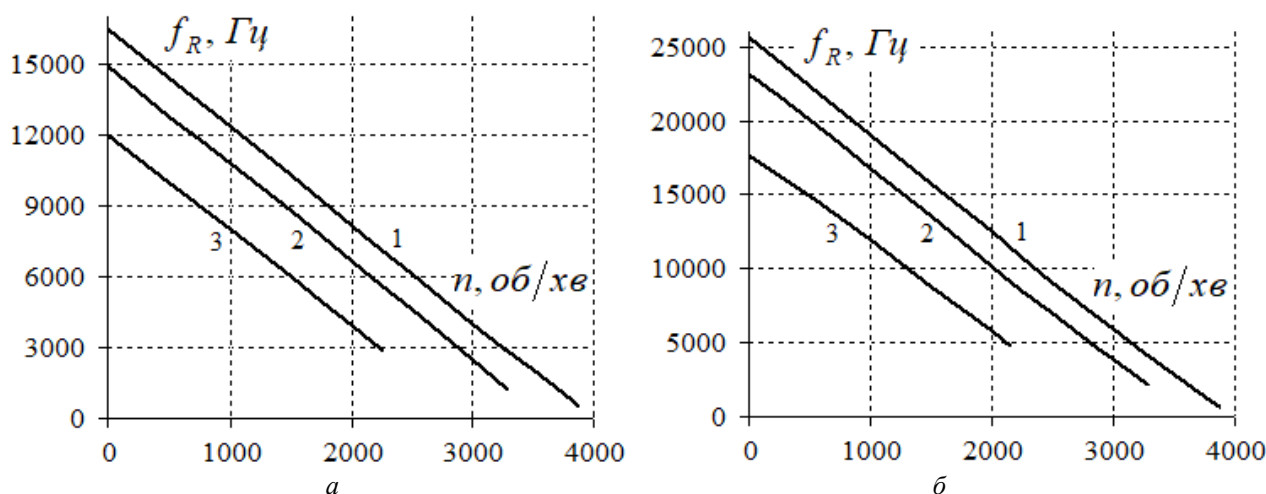


Рис. 16. Залежності частоти f_R перемикання релейного регулятора від частоти обертання n валу двигуна відповідно до характеристик (рис. 14, 20 (1), 40 (2) та 80 (3) А) при тривалості часу відключення транзисторів T_{off} : $4 \cdot 10^{-5}$ (а) і $2 \cdot 10^{-5}$ (б) с

Висновки. У статті досліджено характеристики електроприводу на основі БДПМ як безконтактного функціонального та конструктивного аналога колекторного двигуна постійного струму, призначеного для його заміни та використання як виконавчого елемента в автоматизованих електромеханічних системах без зміни загальної структури їх схеми живлення та управління. У такому випадку на вхід безконтактного електроприводу по двох вхідних провідниках подається імпульсна напруга джерела живлення з регульованою шпаруватістю, яке після випрямлення надходить на вхід трифазного мостового інвертора напруги з БДПМ на виході. При цьому реверс двигуна відбувається за зміни полярності імпульсів напруги живлення. Оскільки на вхід схеми електроприводу подаються прямокутні імпульси напруги, в пропонованій схемі відсутні будь-які накопичувачі електричної енергії у вигляді конденсаторів, а згладжування статорних струмів відбувається тільки за рахунок індуктивного характеру статорних обмоток безконтактного двигуна.

Характеристики аналізованого електроприводу подібні до характеристик БДПМ в традиційній схемі при його живленні від інвертора напруги зі згладжуючим конденсатором у ланці постійного струму, проте в нашому випадку ми не можемо впливати на форму струму двигуна шляхом вибору будь-якого алгоритму комутації транзисторів. У порівнянні з випадком керування колекторним двигуном постійного струму ми маємо значно менше значення електромагнітної сталої часу статорної обмотки. Тому в розглянутому варіанті живлення та управління ПМБД спостерігаються відносно великі значення пульсацій струму, які можуть бути зменшені тільки шляхом збільшення частоти слідування імпульсів напруги джерела живлення або введення в трифазне коло статора додаткових згладжуючих дроселів, що призвело б, природно, до збільшення масо-габаритних показників електроприводу.

Захист БДПМ від перевантаження та перевищення струму статора вище допустимої величини в аналізованому електроприводі може бути здійснений шляхом реалізації системи обмеження струму з релейним однопозиційним регулятором і формувачем сигналу, який протягом заданого інтервалу часу відключає нижню групу транзисторів інвертора напруги.

У цілому проведені дослідження підтвердили можливість реалізації безконтактного функціонального та конструктивного аналога колекторного двигуна постійного струму на основі електроприводу з БДПМ при його зовнішньому живленні імпульсною напругою з регульованою шпаруватістю.

Фінансується за держбюджетною темою «Розробити наукові засади та принципи побудови керованих п-степеневих магнітоелектричних систем з екстремальними характеристиками» (шифр «МЕХАТРОН»), що виконується за Постановою Бюро ВФТПЕ 11.07.2023 р. (Протокол №8). Державний реєстраційний номер роботи 0124U000396. КПКВК 6541030.

1. Справочник по электрическим машинам: в 2 т. Т.2 / под общ. ред. И.П. Копылова, Б.К. Клокова. Москва: Энерготомиздат, 1989. 688 с.
2. Лазарев Г.В., Лановой Г.В., Санченко А.В. и др. Электрические машины постоянного тока для электропривода специального назначения. *Електротехніка і Електромеханіка*. 2002. № 1. С. 40–42.
3. Антонов А.Е. Электрические машины магнитоэлектрического типа. Киев: Институт электродинамики НАН Украины, 2011. 216 с.
4. Башинский В.Г., Шаповалов О.Л., Денисов А.И., Бурсала Е.А., Бурсала А.Л. Влияние пульсаций бесколлекторного двигателя постоянного тока на процесс управления запуском газотурбинного двигателя вертолета. *Технічна електродинаміка*. 2020. С. 56–66. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.02.056>
5. C. S. Raju, S. Samanta Modelling and design of average current filtered BLDC motor drive. 2020 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), Jaipur, India, 2020, Pp. 1–6, DOI: <https://doi.org/10.1109/PEDES49360.2020.9379592>
6. Акинін К.П., Баранніков О.В. Спосіб керування безконтактним двигуном: Пат. на винахід 98265 Україна. МПК H02P 6/00; 21.04.2011.
7. Акинін К.П., Баранніков О.В. Пристрій керування безконтактним двигуном: Пат. на винахід 104079 Україна. МПК H02P 6/00; 30.08.2012.
8. Акинин К.П. Структурная минимизация электроприводов малой мощности на основе бесконтактных двигателей с постоянными магнитами. Киев: «Про Формат», 2020. 392 с.
9. Bose B.K. Modern Power Electronics and AC Drives. New York: Prentice Hall, 2002, 710 p.
10. Силовые полупроводниковые приборы / пер. с англ., под. ред. В.В. Токарева. Воронеж: Элист, 1995. 662 с.
11. Tomofumi Hirose Rectifier Circuit Using FET Bridge Circuit, and method of Controlling the Same: Patent JP 2012085369 A; 26.04.2012.
12. Акинин К.П., Исаков В.Н., Бондарь Е.С. Особенности построения преобразователя частоты для управления асинхронным двигателем компрессора авторефрижератора. Регулируемые асинхронные двигатели: Сб. науч. тр. Киев. Изд-во Ин-та электродинамики НАН Украины, 1997. С. 171–175.

ELECTROMECHANICAL CHARACTERISTICS OF A BRUSHLESS PERMANENT MAGNETS MOTOR WHEN PULSE-WIDTH SUPPLY

K.P. Akinin, V.G. Kireyev, I.S. Petukhov, A.A. Filomenko

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Beresteyskyi Ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine

The paper is devoted to the study of the characteristics and operating modes of a brushless permanent magnet motor in the structure of an electric drive with a two-wire external power supply from a voltage source with pulse-width regulation. The dependences of the motor rotation frequency, the stator current effective value and the average value of the current in the DC link of the voltage inverter, as well as the dependences of the torque coefficient on the average value of the motor torque are given. The influence of the frequency of the pulse supply voltage on the operating modes of the motor is studied. The current and torque limitation modes of the motor in a system with a single-position relay controller and a fixed transistor shutdown interval former are studied. Ref. 12, fig. 16.

Key words: brushless motor with permanent magnets, bridge voltage inverter, pulse-width regulation, electromechanical characteristics.

1. Handbook of electrical machines: in 2 volumes. Vol. 2. Moscow: Energatomizdat, 1989. 688 p.
2. Lazarev G.V., Lanovoy G.V., Sanchenko A.V. DC electric machines for special-purpose electric drives. Electrical Engineering and Electromechanics. 2002. No. 1. Pp. 40–42.
3. Antonov A.E. Magnetolectric electric machines. Kyiv: Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2011. 216 p.
4. Bashinsky V.G., Shapovalov O.L., Denisov A.I., Bursala E.A., Bursala A.L. The influence of pulsations of a brushless DC motor on the process of controlling the launch of a helicopter gas turbine engine. *Technichna elektrodynamika*. 2020. Pp. 56–66. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.02.056>

5. C. S. Raju, S. Samanta Modelling and design of average current filtered BLDC motor drive. 2020 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), Jaipur, India, 2020, pp. 1-6, DOI: <https://doi.org/10.1109/PEDES49360.2020.9379592>
6. Akinin K.P., Barannikov O.V. Method for controlling a brushless motor: Patent Ukraine 98265. MPK N02R 6/00; 04.21.2011.
7. Akinin K.P., Barannikov O.V. Device with brushless motor: Patent Ukraine 104079. MPK N02R 6/00; 08.30.2012.
8. Akinin K.P. Structural minimization of low-power electric drives based on brushless permanent magnet motors. Kyiv: "Pro Format", 2020. 392 p.
9. Bose B.K. Modern Power Electronics and AC Drives. New York: Prentice Hall, 2002, 710 p.
10. Power Semiconductor Devices. Voronezh: Elista, 1995. 662 p.
11. Tomofumi Hirose Rectifier Circuit Using FET Bridge Circuit, and method of Controlling the Same: Patent JP 2012085369 A; 26.04.2012.
12. Akinin K.P., Isakov V.N., Bondar E.S. Features of Designing a Frequency Converter for Controlling an Asynchronous Motor of a Refrigerator Compressor. Adjustable Asynchronous Motors: Coll. of Scientific Works. Kyiv. Publishing House of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 1997. Pp. 171–175.

Надійшла: 14.11.2024

Прийнята: 25.11.2024

Submitted: 14.11.2024

Accepted: 25.11.2024

УДК 621.313

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2024.69.105>

АЛГОРИТМИ ПРОГРАМНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ ЦИФРОВИХ СТАТИСТИЧНО ОПТИМАЛЬНИХ РЕГУЛЯТОРІВ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ ІЗ СТОХАСТИЧНИМИ НАВАНТАЖЕННЯМИ

Ю.В. Шуруб^{1*}, канд. техн. наук, Ю.Л. Цицюрський^{2**}

1 – Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна

2 – Національний університет біоресурсів і природокористування України,

вул. Героїв Оборони, 15, Київ, 03041, Україна

e-mail: yvshur@ukr.net

Статтю присвячено розробці алгоритмів програмної реалізації цифрових статистично оптимальних регуляторів електроприводів, що знаходяться під дією змінних за стохастичними законами динамічних навантажень. На основі неперервних передатних функцій статистично оптимальних регуляторів для подібних навантажень, що можуть бути апроксимовані експоненціальною та експоненціально-косинусною кореляційними функціями, отримано такі алгоритми у вигляді рекурентних різницевих рівнянь, які можуть бути реалізовані програмно. Розроблено рекомендації до точності визначення параметрів відповідних цифрових регуляторів. Бібл. 11, рис. 5.

Ключові слова: статистично оптимальний регулятор, різницеві рівняння, цифровий регулятор.

Вступ. Широкий клас електроприводів, що використовуються в механізмах сільсько-господарського та комунального призначення [1-5], гірничої промисловості [6, 7], мають стохастичні моменти навантаження, які суттєво погіршують техніко-економічні показники роботи таких електроприводів. Підвищити ефективність їхньої роботи можливо за рахунок створення замкнутих систем частотно-регульованого електроприводу із статистично оптимальними регуляторами, синтез яких здійснюється за критерієм мінімуму середньоквадратичної похибки відтворення заданого сигналу. Структура таких регуляторів залежить від статистичних характеристик стохастичних навантажень – кореляційної функції та спектральної густини.

Застосування статистично оптимальних регуляторів асинхронних електроприводів, що виступають як фільтри випадкових коливань навантаження, дає змогу усунути негативні фактори, спричинені стохастичним характером зміни навантаження як при скалярному [8], так і при векторному [9] методах керування. Так, на прикладі моделювання роботи частотно-регульованого електроприводу зі скалярним керуванням прямої частоти дробарки зерна із асинхронним двигуном типу 4A80B2, навантаження якої має експоненціально-косинусну кореляційну функцію, показано [8] підвищення циклових ККД електроприводу на 6 % порівняно з нерегульованим приводом та на 5 % порівняно з частотно-регульованим електроприводом із застосуванням типового ПІ-регулятора, налаштованого на технічний оптимум.

Проблема технічної реалізації систем зі статистично оптимальними регуляторами полягає у тому, що такі регулятори є з'єднанням аперіодичних та форсуючих ланок та не є типовими та відповідно не випускаються серійно промисловістю. Отже, вони мають бути реалізовані за допомогою додаткових до промислових електроприводів технічних засобів. У випадку аналогових статистично оптимальних регуляторів вони можуть бути реалізовані за допомогою схем на операційних підсилювачах. Але на теперішній час є більш доцільним використання цифрових регуляторів, що можуть бути виконані на базі мікропроцесорних пристроїв. Для цього необхідно отримати статистично оптимальні алгоритми регулювання у вигляді рекурентних різницевих рівнянь, що можуть бути реалізовані у вигляді відповідних програм. Водночас необхідно також забезпечити необхідну точність визначення параметрів дискретної передаточної функції таких цифрових регуляторів, щоб вони були еквівалентні за динамічними властивостями відповідним неперервним регуляторам.



Метою даної роботи є розробка алгоритмів програмної реалізації цифрових статистично оптимальних регуляторів електроприводів зі стохастичними навантаженнями у вигляді різницевих рівнянь у рекурентній формі, а також розробка рекомендацій до точності визначення параметрів відповідних регуляторів.

Матеріали досліджень. Розкладення реалізацій моментів опору електроприводів деяких технологічних машин переробної галузі сільського господарства за гармонічними складовими, дослідження їхніх кореляційних функцій показало, що їм властиві стаціонарність та ергодичність [4]. Основними динамічними статистичними характеристиками стохастичних навантажень електроприводів є кореляційна функція, яка визначає середнє значення добутку двох значень цього процесу, зсунутих на деякий проміжок часу, й характеризує його динамічні властивості, та спектральна густина, що характеризує спектральний частотний склад процесу. За кореляційними функціями стохастичні навантаження можуть бути віднесені до двох основних класів: з експоненціальною кореляційною функцією $R(\tau) = De^{-\alpha|\tau|}$ та експоненціально-косинусною кореляційною функцією $R(\tau) = De^{-\alpha|\tau|} \cos \beta\tau$. У цих формулах D – дисперсія випадкового процесу навантаження, α, β – сталі коефіцієнти, τ – зсув часу між двома перерізами стохастичного процесу.

За векторного керування можливе безпосереднє регулювання потокозчеплення ротора через розділення процесів керування потоком та моментом. Але якість фільтрації високочастотних складових навантаження залежить від якості стабілізації контуру потокозчеплення, що досить складно реалізувати для перетворювачів частоти із властивостями джерела напруги через наявність електромагнітного зв'язку між контурами регулювання моменту та потокозчеплення [9]. Тому у рамках цієї роботи розглянемо питання реалізації цифрових статистично оптимальних регуляторів частотно-регульованих електроприводів зі скалярним керуванням.

Лінеаризовану структурну схему електроприводу за системою «перетворювач частоти – асинхронний двигун» зі скалярним керуванням зображено на рис. 1.

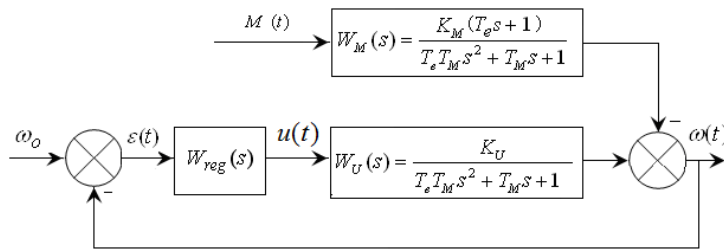


Рис. 1. Структурна схема електроприводу

На цій схемі: ω_0 – сигнал задання (циклічна частота обертання холостого ходу); $\omega(t)$ – вихідна регульована величина електроприводу (циклічна частота обертання); $u(t)$ – сигнал керування електроприводу; $\varepsilon(t)$ – сигнал похибки регулювання; $M(t)$ – випадковий сигнал збурення;

$W_{reg}(s)$ – передаточна функція регулятора; $W_U(s)$ – передаточна функція двигуна за сигналом керування; $W_M(s)$ – передаточна функція двигуна за збуренням.

У передаточних функціях на рис. 1 позначені: s – оператор Лапласа; T_e – електромагнітна постійна часу; T_M – електромеханічна постійна часу асинхронного двигуна; K_U – коефіцієнт передачі за сигналом керування; K_M – коефіцієнт передачі за збуренням.

Дослідження режимів роботи асинхронних електроприводів з випадковим характером зміни навантаження, проведене на прикладі моделювання роботи електроприводу прямоточної дробарки зерна із асинхронним двигуном типу 4A80B2, показало [8], що за навантаження, що має експоненціальну кореляційну функцію $R(\tau) = De^{-\alpha|\tau|}$, передаточною функцією статистично оптимального регулятора буде послідовне з'єднання аперіодичної ланки першого порядку та форсуючої ланки

$$W_{reg}(s) = \frac{a_0 s + a_1}{b_0 s + b_1}, \quad (1)$$

а для навантаження з експоненціально-косінусною кореляційною функцією $R(\tau) = De^{-\alpha|\tau|} \cos \beta\tau$ – послідовне з'єднання аперіодичної ланки другого порядку та форсуючої ланки

$$W_{reg}(s) = \frac{a_0 s + a_1}{b_0 s^2 + b_1 s + b_2}. \quad (2)$$

Коефіцієнти цих передаточних функцій є функціями параметрів передаточних функцій електроприводу за сигналом керування $W_U(s)$ та за сигналом збурення $W_M(s)$ та параметрів кореляційних функцій навантаження $R(\tau)$.

Для визначення алгоритмів програмної реалізації статистично оптимальних регуляторів у цифровому вигляді необхідно отримати їхні різницеві рівняння у рекурентній формі [10]. За навантаження, що має експоненціальну кореляційну функцію, для цього за допомогою виразу передаточної функції (1) отримаємо операторне рівняння регулятора у перетворенні Лапласа:

$$u(s)(b_0 s + b_1) = \varepsilon(s)(a_0 s + a_1). \quad (3)$$

Звідси диференціальне рівняння регулятора (1) матиме наступний вигляд:

$$b_0 \frac{du(t)}{dt} + b_1 u(t) = a_0 \frac{d\varepsilon(t)}{dt} + a_1 \varepsilon(t). \quad (4)$$

Введемо поняття відносних до періоду квантування перших зворотних різниць вихідного та вхідного сигналів цифрового регулятора як аналога першої похідної сигналів неперервного регулятора:

$$\frac{du(t)}{dt} = \frac{u(i) - u(i-1)}{T}, \quad \frac{d\varepsilon(t)}{dt} = \frac{\varepsilon(i) - \varepsilon(i-1)}{T}, \quad (5)$$

де $u(i)$ – вихідний сигнал регулятора, що є сигналом керування електроприводу, на поточному i -му періоді квантування; $\varepsilon(i)$ – вхідний сигнал регулятора, що є сигналом похибки регулювання, на поточному періоді квантування; $u(i-1)$, $\varepsilon(i-1)$ – відповідно вихідний та вхідний сигнали регулятора на попередньому періоді квантування; T – період квантування цифрового регулятора.

Тоді з виразу (4) матимемо рівняння цифрового регулятора у кінцевих різницях, що є аналогом диференціального рівняння неперервного регулятора:

$$\frac{b_0}{T}(u(i) - u(i-1)) + b_1 u(i) = \frac{a_0}{T}(\varepsilon(i) - \varepsilon(i-1)) + a_1 \varepsilon(i), \quad (6)$$

$$\left(\frac{b_0}{T} + b_1\right)u(i) - \frac{b_0}{T}u(i-1) = \left(\frac{a_0}{T} + a_1\right)\varepsilon(i) - \frac{a_0}{T}\varepsilon(i-1). \quad (7)$$

Розв'язком рівняння (7) буде наступне рекурентне співвідношення:

$$u(i) = \frac{\left(\frac{a_0}{T} + a_1\right)}{\left(\frac{b_0}{T} + b_1\right)}\varepsilon(i) - \frac{\frac{a_0}{T}}{\left(\frac{b_0}{T} + b_1\right)}\varepsilon(i-1) + \frac{\frac{b_0}{T}}{\left(\frac{b_0}{T} + b_1\right)}u(i-1). \quad (8)$$

Позначимо коефіцієнти при дискретних змінних $\varepsilon(i)$, $\varepsilon(i-1)$, $u(i-1)$, що є константами, як A_0 , A_1 , A_2 . Тоді алгоритмом програмної реалізації регулятора (1) буде вираз

$$u(i) = A_0 \cdot \varepsilon(i) - A_1 \cdot \varepsilon(i-1) + A_2 \cdot u(i-1). \quad (9)$$

Отже, алгоритм програмної реалізації цифрового статистично оптимального регулятора за навантаження, що має експоненціальну кореляційну функцію, складається з операцій затримки вхідного та вихідного сигналів у буфері мікропроцесора на один період квантування (блоки буферізації z^{-1}), множення змінних на константу (блоки мультиплексорів MPL) та алгебраїчного додавання двох змінних (блоки суматорів з відповідними знаками), що можуть бути реалізовані алгоритмічними або блочними мовами програмування. Блок-схема алгоритму регулювання (9) показана на рис. 2.

Для знаходження дискретної передаточної функції цифрового регулятора, що реалізує алгоритм (18), отримаємо операторне рівняння цього регулятора у Z-перетворенні:

$$u(z) = B_0 \cdot \varepsilon(z) - B_1 \cdot \varepsilon(z) \cdot z^{-1} + B_2 \cdot u(z) \cdot z^{-1} - B_3 \cdot u(z) \cdot z^{-2}. \quad (19)$$

Тоді дискретна передаточна функція цифрового регулятора за навантаження, що має експоненціально-косинусну кореляційну функцію, матиме вигляд:

$$W_{reg}(z) = \frac{u(z)}{\varepsilon(z)} = \frac{B_0 z^2 - B_1 z}{z^2 - B_2 z + B_3}. \quad (20)$$

Слід зазначити, що якість фільтрації випадкових складових моменту навантаження цифровим статистично оптимальним регулятором порівняно з неперервним регулятором залежить як від періоду квантування, так і від точності визначення та завдання у програмному коді мікропроцесора параметрів цифрового регулятора. Задача вибору раціонального періоду квантування є досить трудомісткою та неоднозначною через суб'єктивність підходів проєктувальників до завдання необхідної точності відтворення неперервного сигналу (смуги пропускання) [10, 11] та вимагає окремого дослідження. У рамках даної роботи розглянемо вплив точності визначення параметрів цифрового регулятора при переході від неперервної до дискретної передаточної функції регулятора за періоду квантування $T = 0.001$ с.

Нехай передаточна функція неперервного статистично оптимального регулятора (1) у числовому вигляді є наступною:

$$W_{reg}(s) = \frac{0.367s + 0.443}{0.974s + 0.657}. \quad (21)$$

Перехід від неперервної до дискретної передаточної функції регулятора (21) можливо здійснити шляхом Z-перетворення функції (21), послідовно з'єднаної з фіксатором нульового порядку, за допомогою прикладних програмних пакетів або за допомогою теорем Z-перетворення. Процедура знаходження дискретної передаточної функції, що відповідає (21), за $T = 0.001$ с у пакеті Matlab подана на рис. 4 а.

```
>> w=tf([0.367 0.443],[0.974 0.657])
```

```
w =
```

```
0.367 s + 0.443
-----
0.974 s + 0.657
```

```
Continuous-time transfer function.
```

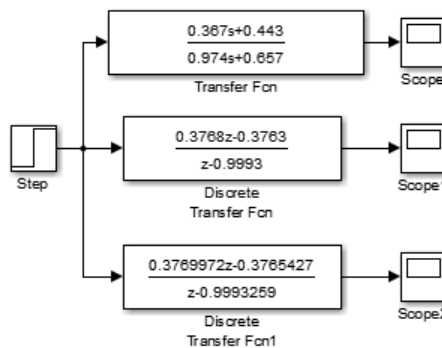
```
>> ws=c2d(w,0.001)
```

```
ws =
```

```
0.3768 z - 0.3763
-----
z - 0.9993
```

```
Sample time: 0.001 seconds
Discrete-time transfer function.
```

а



б

Рис. 4. Знаходження дискретної передаточної функції у пакеті Matlab та Simulink-моделі регуляторів

Зазначимо, що параметри дискретної передаточної функції у Matlab визначаються з одинарною точністю, тобто до четвертого значущого числа:

$$W_{reg}(z) = \frac{0.3768z - 0.3763}{0.974s + 0.657}. \quad (22)$$

Порівняння за допомогою моделювання у пакеті Matlab (перша та друга згори схеми на рис. 4 б) перехідних характеристик регуляторів (21) (рис. 5 а) та (22) (рис. 5 б) показує їхнє незбігання.

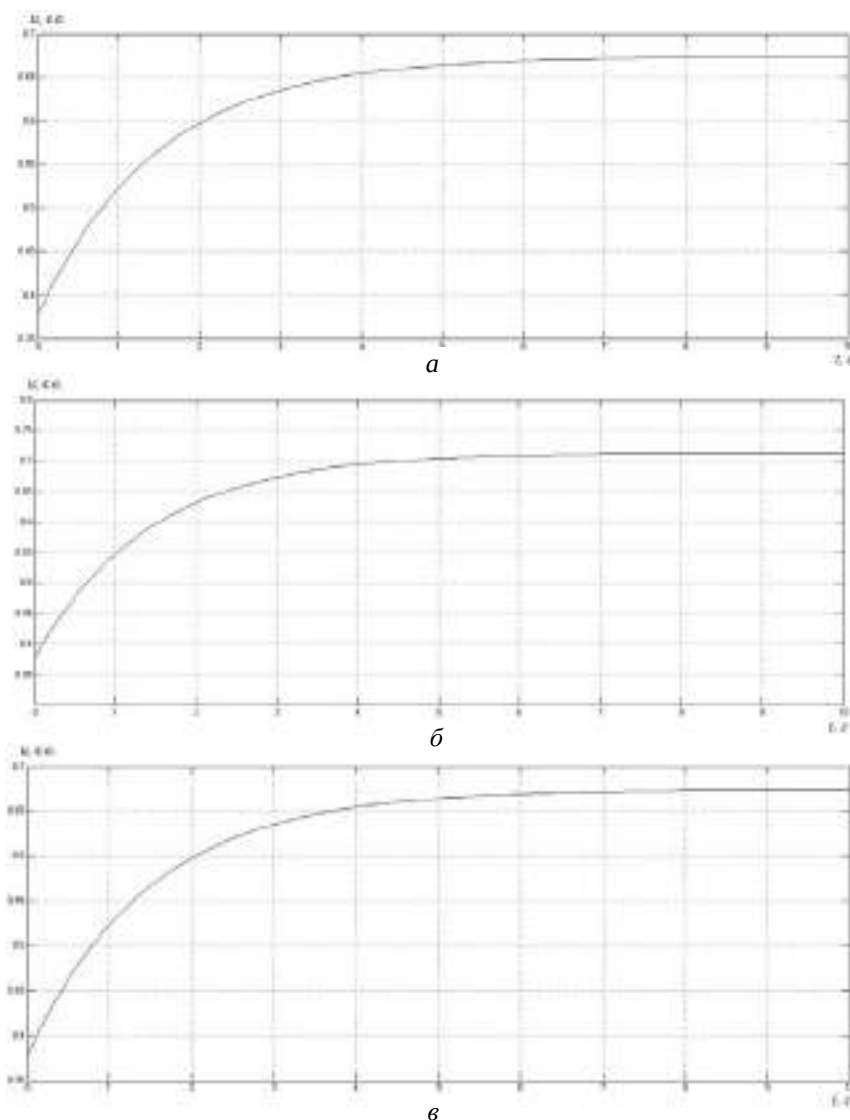


Рис. 5. Перехідні характеристики регуляторів

Усталені значення вихідних величин цих регуляторів за одиничної входної дії теж відрізняються:

$$W_{reg}(s)_{s \rightarrow 0} = \frac{0.367s + 0.443}{0.974s + 0.657} = 0.674, \quad (23)$$

а

$$W_{reg}(z)_{z \rightarrow 1} = \frac{0.3768z - 0.3763}{z - 0.9993} = \frac{0.0005}{0.0007} = 0.714. \quad (24)$$

Тепер знайдемо параметри дискретної передаточної функції того ж регулятора за допомогою формул (8), (9) та (11), проводячи розрахунки з подвійною точністю, тобто до сьомого значущого числа:

$$A_0 = \frac{\frac{0.367}{0.001} + 0.443}{\frac{0.974}{0.001} + 0.657} = \frac{367.443}{974.657} = 0.3769972, \quad A_1 = \frac{367}{974.657} = 0.3765427, \quad A_2 = \frac{974}{974.657} = 0.9993259.$$

Дискретна передаточна функція регулятора, визначена з подвійною точністю, матиме вигляд:

$$W_{reg}(z) = \frac{0.3769972z - 0.3765427}{z - 0.9993259}. \quad (25)$$

Перехідна характеристика регулятора (25) (рис. 5 в), отримана за допомогою третьої згори схеми на рис. 4 б, збігається з перехідною характеристикою регулятора (21) (рис. 5 а). Також збігаються їхні усталені значення

$$W_{reg}(z)_{z \rightarrow 1} = \frac{0.3769972z - 0.3765427}{z - 0.9993259} = \frac{0.0004545}{0.0006741} = 0.674, \quad (26)$$

що відповідає усталеному значенню (23).

Низка досліджень, проведених для інших видів статистично оптимальних регуляторів та їхніх параметрів, показала, що точність розрахунків при визначенні параметрів дискретної передатної функції до сьомого значущого числа є достатньою для збігу перехідних характеристик неперервного та цифрового регуляторів за досить малих періодів квантування. Отже, визначення параметрів цифрових регуляторів треба проводити з подвійною точністю, причому як при використанні програмних пакетів (що не усі пакети можуть забезпечити), так і при використанні теорем Z-перетворення, що є досить трудомістким. Більш раціональним способом може бути використання різницевих рівнянь, запропонованих у цій роботі. Таку ж точність завдання параметрів треба вимагати і від мікропроцесорного пристрою, що реалізує дані алгоритми регулювання.

Висновки. Розроблено алгоритми програмної реалізації цифрових статистично оптимальних регуляторів асинхронних електроприводів із стохастичними навантаженнями, чий кореляційні функції можуть бути апроксимовані експоненціальними та експоненціально-косинусними залежностями. Дані алгоритми отримано у вигляді рекурентних різницевих рівнянь, що можуть бути реалізовані програмно за допомогою операцій затримки вхідного та вихідного сигналів цифрового регулятора у буфері мікропроцесора на один чи два періоди квантування, множення змінних на константу та алгебраїчного додавання двох змінних. Визначення параметрів цифрових регуляторів та їхнє завдання у програмному коді мікропроцесора необхідно здійснювати з подвійною точністю до сьомого значущого числа, що при досить малих періодах квантування може забезпечити еквівалентність за динамічними властивостями цифрового та неперервного регуляторів.

Роботу виконано за фінансової підтримки Національного фонду досліджень України в рамках договору № 175/0075 «Електромеханічні системи підвищеної енергоефективності для енергетики, технологій і транспорту».

1. Гаврилук І.А., Ільчов І.П., Хандола Ю.М. Аналіз навантажувальних діаграм машин і механізмів зі змінним навантаженням та їх зображення за допомогою ряду Фур'є. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка "Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України"*. 2009. Вип. 83. С. 77–83.
2. Ільчов І.П., Хандола Ю.М., Середа А.І., Хандола О.Ю., Федюшко Ю.М. Методи вибору приводних електродвигунів для машин та механізмів, які працюють при випадковому навантаженні. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка "Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України"*. 2011. Вип. 116. С. 69–72.
3. Смуригін В.М., Катюха А.А. Теоретичне моделювання електроприводу подрібнювачів зерна. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика*. 2010. № 28. С. 238–239.
4. Шуруб Ю.В. Розробка системи керування трифазно-однофазних асинхронних електроприводів при випадкових навантаженнях. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. 2012. Вип. 1(17). С. 12–15.
5. Shurub Y., Dudnyk A., Vasilenkov V., Lavinskiy D. Application of a Kalman filter in scalar form for discrete control of electromechanical systems. *IEEE International Conference on Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP)*. Kremenchuk, Ukraine, September 21–25, 2020. Pp. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/PAEP49887.2020.9240805>
6. Морозов Д.И. Синтез модели формирования момента сопротивления молотковой дробилки. *Вісник КДПУ*. 2006. № 4(39). С. 46–48.
7. Зеленев А.Б., Шевченко І.С., Морозов Д.І. Синтез алгоритмів релейних керувань електроприводами механізмів з випадковим характером навантаження. *Електроінформ*. 2007. № 2. С. 9–11.
8. Шуруб Ю.В. Статистична оптимізація частотно регульованих асинхронних електроприводів при скалярному керуванні. *Електротехніка і Електромеханіка*. 2017. № 1. С. 26–30. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2017.1.05>

9. Шуруб Ю.В., Дудник А.О., Лавінський Д.С. Оптимізація регуляторів частотно керованих асинхронних електроприводів при стохастичних навантаженнях. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 4. С. 53–55.
10. Kuo B. Digital control systems. New York: Oxford University Press, 1995. 751 p.
11. Попович М.Г., Ковальчук О.В. Теорія автоматичного керування. К.: Либідь, 2007. 656 с.

ALGORITHMS FOR THE PROGRAMM IMPLEMENTATION OF DIGITAL STATISTICALLY OPTIMAL REGULATORS OF INDUCTION ELECTRIC DRIVES WITH STOCHASTIC LOADS

Yu.V. Shurub¹, Yu.L. Tsitsyurskiy²

1 – Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,
Beresteyskiy pr., 56, Kyiv-57, 03057, Ukraine

2 – National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine,
Heroiv Oborony str., 15, Kyiv-41, 03041, Ukraine

e-mail: yvshur@ukr.net

The paper is devoted to the development of algorithms for the programm implementation of digital statistically optimal regulators of electric drives, which are under the influence of dynamic loads that change according to stochastic laws. On the basis of continuous transfer functions of statistically optimal regulators for similar loads, which can be approximated by exponential and exponential-cosine correlation functions, the following algorithms were obtained in the form of recurrent difference equations, which can be implemented by software. Recommendations have been developed for the accuracy of determining the parameters of the corresponding digital regulators. Ref. 11, fig. 5.

Keywords: statistically optimal regulator, difference equations, digital regulator.

1. Gavrilyuk I.A., Ilyichov I.P., Khandola Yu.M. Analysis of load diagrams of machines and mechanisms with variable load and their representation using the Fourier series. *Visnyk KHNTUSH im. P. Vasylenka Problemy enerhozabezpechennya ta enerhozberezhennya v APK Ukrayiny*. 2009. Vyp. 83. Pp. 77–83. (Ukr)
2. Ilyichov I.P., Khandola Yu.M., Sereda A.I., Khandola O.Yu., Fedyushko Yu.M. Methods of selecting drive electric motors for machines and mechanisms that operate under random loading. *Visnyk KHNTUSH im. P. Vasylenka Problemy enerhozabezpechennya ta enerhozberezhennya v APK Ukrayiny*. 2011. Vyp. 116. Pp. 69–72. (Ukr)
3. Smurygin V.M., Katyukha A.A. Theoretical modeling of the electric drive of grain crushers. *Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu KHPI. Problemy avtomatyzovanoho elektropyvoda. Teoriya i praktyka*. 2010. No 28. Pp. 238–239. (Ukr)
4. Shurub Yu.V. Working out of system of control of three-one phase induction electric drives at random loads. *Elektromekhanichni i energozberigayuchi systemy*. 2012. No 1. Pp. 12–15. (Ukr)
5. Shurub Y., Dudnyk A., Vasilenkov V., Lavinskiy D. Application of a Kalman filter in scalar form for discrete control of electromechanical systems. *IEEE International Conference on Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP)*. Kremenichuk, Ukraine, September 21-25, 2020. Pp. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/PAEP49887.2020.9240805>
6. Morozov D.I. Synthesis of a model for the formation of the moment of resistance of a hammer crusher. *Visnyk KDPU*. 2006. No 4(39). Pp. 46–48. (Rus)
7. Zelenov A.B., Shevchenko I.S., Morozov D.I. Synthesis of algorithms of relay-type regulation of electrical drives of mechanisms with random load. *Electroinform*. 2007. No 2. Pp. 9–11. (Ukr)
8. Shurub Yu.V. Statistical optimization of frequency regulated induction electric drives with scalar control. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2017. No1. Pp. 26–30. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2017.1.05> (Ukr)
9. Shurub Y.V., Dudnyk A.O., Lavinskiy D.S. Optimization of regulators of frequency controlled induction electric drives under the stochastic loadings. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2016. No 4. Pp. 53–55. (Ukr)
10. Kuo B. Digital control systems. New York: Oxford University Press, 1995. 751 p.
11. Popovych M.G., Kovalchuk O.V. Theory of automatic control: textbook. Kyiv: Lybid, 2007. 656 p. (Ukr)

Надійшла: 17.10.2024
Прийнята: 18.11.2024

Submitted: 17.10.2024
Accepted: 18.11.2024

НАПІВПРОВІДНИКОВІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

УДК 621.314

СПОСОБИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ІМПУЛЬСНИХ ПРИСТРОЇВ СИЛОВОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ

В.В. Голубєв*, канд. техн. наук, **В.М. Губаревич****, канд. техн. наук,
В.І. Зозульов***, канд. техн. наук, **Ю.В. Маруня******, канд. техн. наук, **А.І. Сторожук**

Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна
e-mail: marunia@ied.org.ua

У роботі розглянуто показові магнітно-напівпровідникові генератори імпульсів (МНГІ), включно з їхніми вдосконаленими вузлами, та регулятор напруги уніполярного струму. Наведено переваги МНГІ-1 із модернізованим вхідним вузлом DC/AC; МНГІ-2 із дросельним вихідним вузлом формування одноктактних імпульсів; МНГІ-3 із трансформаторним вихідним вузлом формування одноктактних імпульсів порівняно з відомими аналогами, в яких здійснюється на їхньому високовольтному виході уніполяризація біполярних імпульсів за допомогою численних напівпровідникових приладів (МНГІ-ПП). Встановлено, що надійність МНГІ-2 та МНГІ-3 є принаймні на порядок більшою, ніж надійність МНГІ-ПП. До того ж за допомогою МНГІ-ПП неможливо реалізувати функції щодо гальванічних розв'язок, синхронізації навантажень, спрощення захисту навантажень та узгодження без ускладнень МНГІ-ПП з низькоомними та ємнісними навантаженнями. Показано, що регулятор напруги змінного струму спроможний регулювати напругу на навантаженні від нуля до максимального значення, блокувати навантаження, відводити невикористану електроенергію, опрацьовувати імпульси від наносекундного до мілісекундного діапазонів. У підсумку одержано матеріали для подальшого опрацювання узагальненого комплексного синтезу щодо вдосконалення вищезгаданих пристроїв та інших імпульсних пристроїв силової електроніки. Бібл. 5, рис. 4.

Ключові слова: магнітно-напівпровідникові генератори імпульсів, регулятор напруги уніполярного струму, вхідний вузол DC/AC, вихідний дросельний вузол AC/DC, вихідний трансформаторний вузол AC/DC, узагальнений комплексний синтез.

Вступ. Магнітно-напівпровідникові генератори імпульсів (МНГІ) базуються на поєднанні в них ключів різних видів: магнітних, напівпровідникових та комбінованих. Ці МНГІ призначені для застосовування за умов формування ними високовольтних (до 50 кВ), сильноточових імпульсів мікро- та наносекундних діапазонів. Водночас слід зазначити, що МНГІ мають порівняно низьку надійність, ускладнені схемні рішення та проблемні питання щодо ефективного використання окремими споживачами електроімпульсного живлення стосовно гальванічної розв'язки, синхронного живлення двох і більше навантажень, а також щодо захисту навантажень та узгодження МНГІ з низькоомними та ємнісними навантаженнями [1]. За підсумками напрацювань у напрямку підвищення ефективності МНГІ в цілому та їхніх визначних вузлів встановлено: у вихідному вузлі МНГІ замість численних напівпровідникових приладів застосовувати дросельні чи трансформаторні вузли формування одноктактних імпульсів; якщо в МНГІ немає згаданих дросельних чи трансформаторних вузлів, то доцільно на виході МНГІ використовувати регулятор напруги уніполярного струму, який спроможний регулювати вихідні імпульси від нуля до максимального значення, блокувати навантаження, відводити від нього невикористану електроенергію; в МНГІ перед імпульсним трансформатором Т1 вигідно застосовувати авторський вузол DC/AC, що дає можливість спростити схеми МНГІ та



підвищити їхню надійність. Визначено, що найбільш перспективним для МНГІ є комплексна побудова їхніх структур із використанням елементів, ключів та вузлів, які попередньо підібрані взаємодоповнювальними для досягнення найбільш вигідному результату, тобто відповідно до їхнього узагальненого комплексного синтезу (УКС). У роботі тезово розглянуто вступні аспекти щодо УКС та представлено найбільш показові пристрої, що побудовані згідно з УКС. Актуальність роботи визначається тим, що МПГІ, попри широке застосування у засобах сучасних електроімпульсних технологій, мають зменшені показники якості. Тому питання помітного поліпшення основних показників якості МНГІ стало нагальним.

Метою роботи є обґрунтування розвитку та підвищення ефективності МНГІ як пристроїв силовій електроніці із використанням опрацьованих показових МНГІ та їхніх вдосконалених базових вузлів, приклади реалізації яких сприятимуть поліпшенню показників якості МНГІ та забезпеченню вимог до сучасного імпульсного електроживлення засобів передових технологій.

Обґрунтування та результати досліджень

1. Вступні визначення узагальненого комплексного синтезу (УКС) стосовно проектування розглянутих далі магнітно-напівпровідникових імпульсних пристроїв (МНІП) та інших імпульсних пристроїв силовій електроніки. Такий УКС вимагає попереднього підбору компонентів для побудови (синтезу) згаданих пристроїв таким чином, щоб ці компоненти за своїми параметрами були взаємодоповнювальними та в разі їхнього об'єднання в структури пристроїв сприяли підвищенню ефективності цих пристроїв. УКС передбачає можливість його застосування практично в будь-яких пристроях силовій електроніки (ПСЕ), тобто можна вважати його узагальненим. УКС базується на значному досвіді створення ПСЕ, винахідництві, розрахунках, фізичному та комп'ютерному моделюванні. Практичне використання УКС сприяє помітному поліпшенню функціональних можливостей та пріоритетних параметрів ПСЕ, що відображається в цій роботі далі представленими ПСЕ, визначеними як найбільш показові щодо застосування УКС.

2. Магнітно-напівпровідникові генератори імпульсів. Магнітно-напівпровідникові генератори високовольтних імпульсів (МНГІ) є невід'ємною складовою обладнання сучасних передових електроімпульсних технологій. Підвищення ефективності цих технологій та розширення їхніх застосувань безпосередньо пов'язано із необхідністю помітного поліпшення основних показників МНГІ. Також слід відмітити, що МНГІ відносяться до одних з найбільш складних імпульсних пристроїв силовій електроніки. Тому відповідно до згаданого вище далі наведено два зразково-показових МНГІ.

2а. Високовольтний наносекундний МНГІ із компресійним потроєнням напруги та діодним перервником струму (рис. 1). Схема, що зображена на рис. 1, відрізняється від відомої [2] тим, що вхідний вузол DC/AC має тільки один транзистор VT замість чотирьох

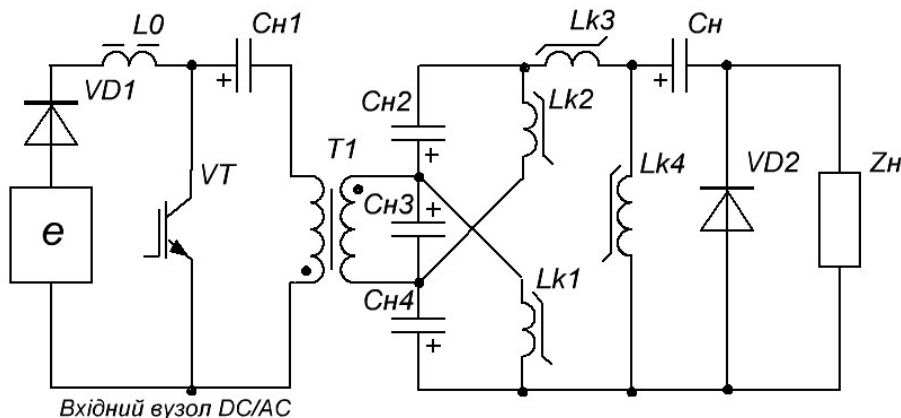


Рис. 1. Високовольтний наносекундний МНГІ із компресійним потроєнням напруги та діодним перервником струму

транзисторів згаданої відомої схеми МНГІ. Це дає можливість зменшити тривалість імпульсів через первинну обмотку Т1 і відповідно зменшити його встановлену потужність та в цілому досягти спрощення схеми (рис. 1) та підвищення її надійності.

26. Модернізований магнітно-напівпровідниковий генератор із дросельним вузлом формування двотактних однополярних вихідних імпульсів (рис. 2). На рис. 2 а – вхідний вузол DC/AC, наведений на рис. 1; рис. 2 б – вузли компресії імпульсів ВК1-1. ВК1-п (від одного до трьох); рис. 2 в – схема вихідного дросельного вузла формування двотактних однополярних імпульсів.

У переважній більшості навантаженнями МПГІ є такими, що потребують однополярного імпульсного живлення. Помітна частина відомих МНГІ, наприклад [3, 4], мають після імпульсного трансформатора Т1 структуру з однополярними ВКІ, що є негативним для магнітних елементів МПГІ, або ж однополяризують (випрямляють) вихідні двополярні імпульси за допомогою напівпровідникових приладів за напруги до (20...30) кВ. Тобто функціонування ВКІ, що мають магнітні елементи за однополярних імпульсів, а також однополяризація двополярних імпульсів із використанням напівпровідникових приладів, є неприйнятними [5].

Основною показовою властивістю вузла рис. 2 в є те, що він спроможний ефективно функціонувати як «випрямляч» двополярних високовольтних імпульсів, а також здатний виконувати необхідні регулювання створених імпульсів (їхню амплітуду, асиметричність, полярність, передімпульсну модуляцію) та реалізовувати деякі інші спецфункції.

Все це дає підставу розглядати МНГІ (рис. 2) як найбільш універсальний МНГІ. Особливо, коли передбачені високі напруги з великими потужностями генерування імпульсів, підвищені частоти проходження імпульсів, формування спеціалізованих імпульсів, включно з чергуванням уніполярних імпульсів і біполярних, висока надійність МНГІ. У доповнення до цього МНГІ проектно опрацьовані для нього позитивні властивості: додаткова гальванічна розв'язка із навантаженням, електроімпульсне живлення декількох навантажень синхронізованими імпульсами за різних рівнів напруги та з гальванічною розв'язкою цих навантажень між собою.

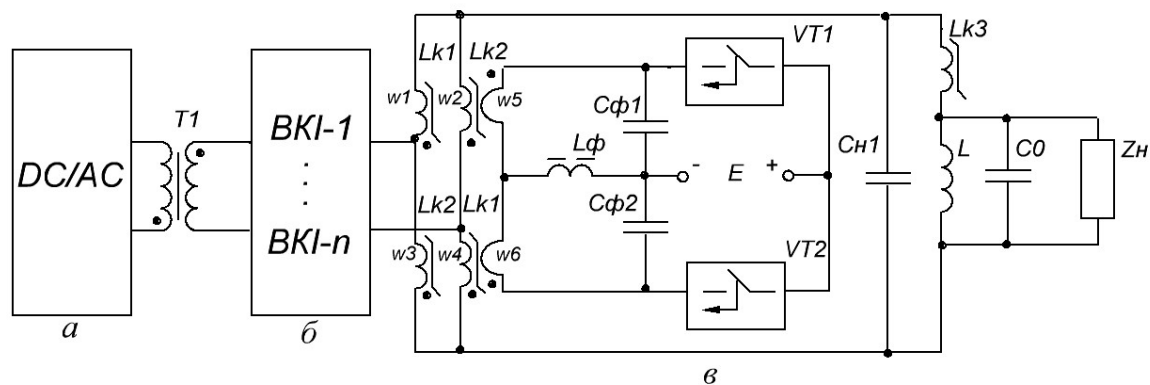


Рис. 2. Модернізований магнітно-напівпровідниковий генератор із дросельним вузлом формування двотактних однополярних вихідних імпульсів

Викладений матеріал щодо МНГІ (рис. 2) дає підставу стверджувати, що його схемне рішення зі згаданими доповненнями в ряді випадків є одним із найефективніших у разі його реалізації, а при вирішенні особливо складних задач щодо проектування спеціальних МНГІ – навіть незамінним (щодо використання суттєвих принципів побудови схеми МНГІ, рис. 2). На науково-технічне рішення щодо МНГІ і особливо щодо вузла рис. 2 в одержано відповідно патент України (№51753 Н03К 7/00, Н03К 3/00).

3. Регулятор напруги уніполярного струму (рис. 3). У випадках, коли в структурі МНГІ до кінцевого вузла із навантаженням формуються біполярні імпульси, а на виході МНГІ мають бути уніполярні імпульси, доцільно застосовувати як вихідний вузол МНГІ

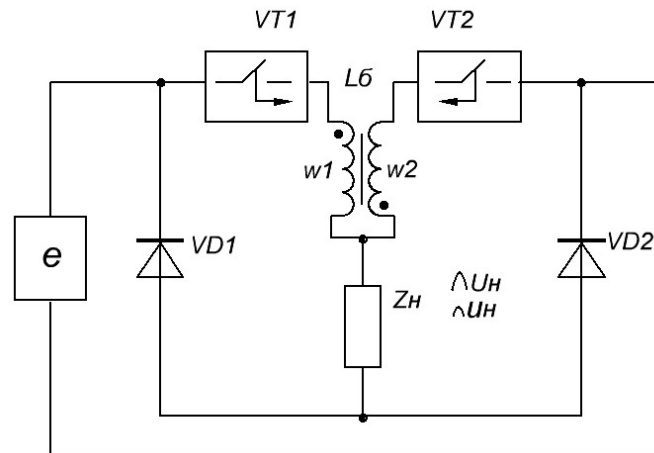


Рис. 3. Регулятор напруги уніполярного струму

пропонованого регулятора напруги уніполярного струму. До того ж за умов, коли джерело e генерує напівхвилі напруг U (+) та U (-) або біполярних імпульсів u (+) та u (-), за яких можливо застосовувати напівпровідникові прилади. Цей регулятор, завдяки введенню до нього двообмоткового дроселя другого напівпровідникового ключа та двох діодів, дає змогу досягти регулювання напруги на навантаженні від нуля до максимального значення, яке мінімально відрізняється від вхідної напруги; блокування навантаження від джерела біполярних імпульсів; відвід невикористаної електроенергії в навантаження; опрацювання імпульсів від наносекундного до мілісекундного діапазонів.

Параметричні та функціональні показники цього регулятора дають підставу ефективно використовувати його не тільки в МНГІ, а також відповідно в інших засобах силової електроніки. Щодо регулятора (рис. 3) одержано патент (№155941 Н02М 5/00, Н02М 7/00).

4. Формування двотактних уніполярних імпульсів за допомогою комутуючих трансформаторів (патент №93925 Н03К 7/00, Н03К 3/53). Фрагмент схеми з трансформаторним вузлом формування двотактних уніполярних імпульсів, вхідні біполярні імпульси цього вузла та сформовані ним уніполярні імпульси наведено на рис. 4.

Цей вузол має такі самі позитивні властивості, як і вихідний дросельний вузол МНГІ (рис. 2). Але йому властиві додаткові важливі функції:

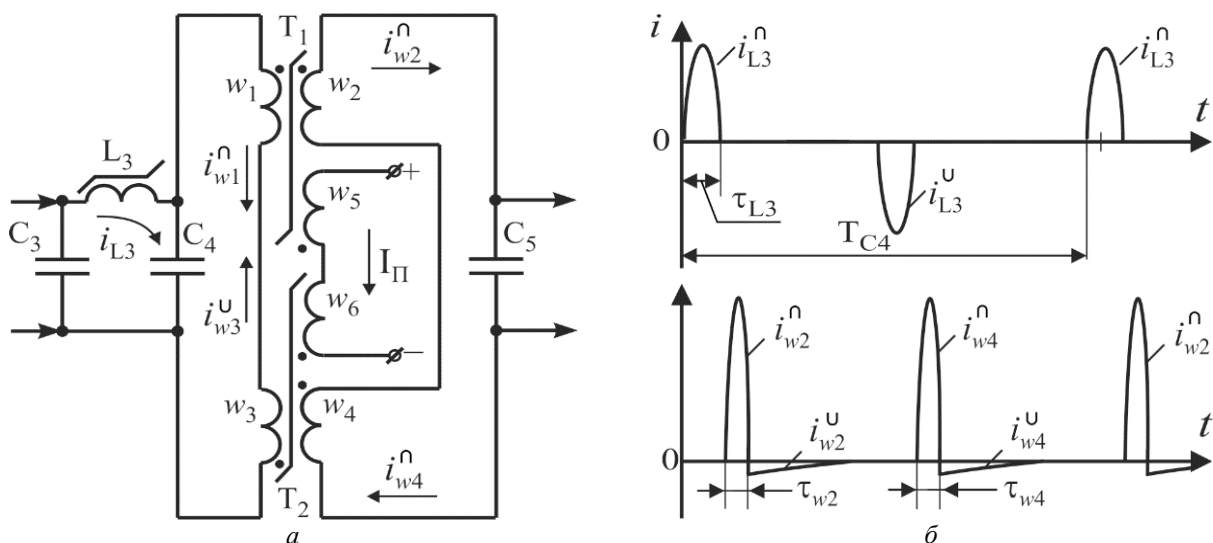


Рис. 4. Трансформаторний вузол формування двотактних уніполярних імпульсів (а) та епюри вхідних та вихідних імпульсів цього вузла (б)

- 1) гальванічна розв'язка навантаження з напругою джерела електроживлення;
- 2) забезпечення імпульсним синхронізованим електроживленням декількох гальванічно розв'язаних між собою навантажень;
- 3) спрощено здійснюються захисні функції;
- 4) без додаткових ускладнень можливе узгодження з низькоомними та ємнісними навантаженнями.

Слід також зазначити, що затрати на уніполяризацію («випрямлення») біполярних імпульсів за допомогою дросельних (рис. 2) чи трансформаторних (рис. 4) вузлів є співрозмірними з МНГІ (ПП), в яких здійснюється згадана уніполяризація біполярних імпульсів за допомогою напівпровідникових приладів. Але заміна численних напівпровідникових приладів у високовольтній частині МПГІ (ПП) збільшує принаймні на порядок надійність функціонування розглянутих МПГІ (рис.2) та МПГІ (рис. 4). Крім того, за допомогою МПГІ (ПП) неможлива або вкрай невигідна реалізація функції зазначених вище пунктів 1) – 4).

Висновки. Щодо представлених МНГІ, що мають у своїй структурі вузли, які відзначаються більш широкими можливостями та зменшеними економічними затратами на свою реалізацію, з'ясовано більш надійне покращене функціонування в порівнянні з напівпровідниковими аналогами таких вузлів, що визначається отриманими покращеними показниками якості сформованих імпульсів та електромагнітною сумісністю з мережею живлення, а також спроможністю забезпечення вимог до імпульсного електроживлення засобів передових технологій.

У підсумку визначено, що: 1) введення як вихідного для МНГІ комутуючих дросельного чи трансформаторного вузлів виключає вкрай невигідне застосування за високих напруг (до 50кВ) численних напівпровідникових приладів. Водночас збільшується принаймні на порядок надійність функціонування МНГІ та покращуються вартісні та інші показники якості. А забезпечення низки вимог для імпульсного електроживлення можливо тільки МНГІ зі згаданим трансформаторним вузлом; 2) на вході МНГІ доцільно встановлювати вхідний вузол DC/AC, що дає можливість спрощення схеми МНГІ та підвищення її надійності; 3) якщо на виході МНГІ немає згаданих дросельного чи трансформаторного вузлів, то доцільно ввести в структуру МНГІ регулятор напруги уніполярного струму, за допомогою якого можливо значно розширити вимоги для імпульсного електроживлення навантаження МНГІ. Щодо розглянутих МНГІ та їхніх вузлів визначено, що найбільш прийнятним для МНГІ є узагальнена побудова їхніх структур із використанням об'єктів, які попередньо вибрані взаємодоповнювальними згідно з узагальненим комплексним синтезом (УКС), який тезово наведено у вступній частині цієї роботи.

1. Волков И.В., Зозулев В.И., Шолох Д.А. Магнитно-полупроводниковые импульсные устройства преобразовательной техники. К.: Наук. думка, 2016. 230 с.
2. Переверзев А.В., Семенов В.В., Литвиненко Т.Г. Высоковольтный наносекундный генератор с устроением напряжения в ячейке магнитной компрессии. *Технічна електродинаміка*. Тем. випуск «Проблеми сучасної електротехніки». 2006. С. 13–18.
3. Бойко Н.І. Потужні генератори імпульсів високої напруги з наносекундними фронтами. *Електротехніка та електромеханіка*. 2018. Вип. 1. С. 59–61. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2018.1.09>
4. Патент на КМ №73733 України, МПК B21D 26/14. Генератор багаторазових уніполярних імпульсів струму для магнітно-імпульсної обробки металів. Батигін Ю.В., Дробінін О.М., Чаплигін Є.О., Гнатов А.В., Аргун Щ.В., Дзюбенко О.А. Заявл. 24.02.2012; опубл. 10.10.2012, Бюл. №19.
5. Balcerak M., Hoiub M., Paika R. High voltage pulse generation using magnetic pulse compression. *Archives of Electrical Engineering*, 2013. Vol. 62. No. 3. Pp. 463–472. DOI: <https://doi.org/10.2478/ae-2013-0037>

METHODS OF INCREASING THE EFFICIENCY OF PULSE POWER ELECTRONICS DEVICES

V. V. Golubev, V. M. Gybarevich, V. I. Zozulev, Yu. V. Marunia, A. I. Storozhuk

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Beresteyskyi Ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine

e-mail: marunia@ied.org.ua

The paper examines demonstrative magnetic-semiconductor pulse generators (MSPGs), including their improved assemblies and a unipolar current voltage regulator. The advantages are given: MSPGs -1 with a modernized DC/AC input unit; MSPGs -2 with a throttle output unit for the formation of single-stroke pulses; MSPGs -3 with a transformer output unit for the formation of single-cycle pulses in comparison with known analogues, in which unipolarization of bipolar pulses is carried out at their high-voltage output using numerous semiconductor devices (MSPGs -SD). It was established that the reliability of MSPGs -2 and MSPGs -3 is, at least, an order of magnitude greater than the reliability of MSPGs -SD. In addition, with the help of MSPGs -SD, it is impossible to implement functions related to galvanic isolation, synchronization of loads, simplification of load protection and uncomplicated matching of MSPGs -SD with low-resistance and capacitive loads. It is shown that the AC voltage regulator is able to regulate the voltage on the load from zero to the maximum value, block the load, divert unused electricity, process pulses from nanosecond to millisecond ranges. As a result, materials were obtained for the further processing of the generalized complex synthesis for the improvement of the above-mentioned devices and other impulse devices of power electronics. Ref. 5, fig. 4.

Key words: magnetic semiconductor pulse generators, unipolar current voltage regulator, DC/AC input node, AC/DC output choke node, AC/DC output transformer node, generalized complex synthesis.

1. Volkov I.V., Zozulev V.I., Sholoh D.A. Magnetic-semiconductor impulse devices of converting technology. K.: Naukova dumka, 2016. 230 p. (Rus)
2. Pereverzev A.V., Semenov V.V., Lytvynenko T.G. High-voltage nanosecond generator with voltage tripling in a magnetic compression cell. *Tekhnichna elektrodynamika*. Tem. issue Problems of modern electrical engineering. 2006. Pp. 13–18. (Rus)
3. Boyko N.I. Powerful generators of high voltage pulses with nanosecond fronts. *Elektrotehnika ta elektromekhanika*. 2018, vol. 1. Pp. 59–61. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2018.1.09> (Ukr)
4. Patent on KM No. 73733 of Ukraine, МПК B21D 26/14. Generator of multiple unipolar current pulses for magnetic pulse processing of metals. Batygin Y.V., Drobinin O.M., Chaplygin E.O., Hnatov A.V., Argun Sh.V., Dzyubenko O.A. Application 24.02.2012; published 10.10.2012. Bull. No. 19.
5. Balcerak M., Hoiub M., Paika R. High voltage pulse generation using magnetic pulse compression. *Archives of Electrical Engineering*, 2013. Vol. 62. No. 3. Pp. 463–472. DOI: <https://doi.org/10.2478/aee-2013-0037>

Надійшла: 10.10.2024

Прийнята: 25.10.2024

Submitted: 10.10.2024

Accepted: 25.10.2024

ВИМІРЮВАННЯ ТА ДІАГНОСТИКА В ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЦІ

УДК: 621.317.39

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2024.69.119>

РОЗРАХУНОК ПОХИБКИ ЄМНІСНОГО СЕНСОРА ПОВІТРЯНОГО ПРОМІЖКУ В ГІДРОГЕНЕРАТОРАХ З СИСТЕМОЮ КОМПЛАНАРНИХ ЕЛЕКТРОДІВ, ЗУМОВЛЕНОЇ ПЕРЕКОСОМ

А.С. Левицький^{1*}, докт. техн. наук, Є.О. Зайцев^{1**}, докт. техн. наук, В. Л. Рассовський^{2***}, С.А. Закусило^{1****}

1 – Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна
e-mail: levitskiyanatoliymail@gmail.com, zaitsev@i.ua, sergy_zakusilo@i.ua

2 – ПрАТ "Укргідроенерго",
м. Вишгород, Київська обл., 07300, Україна
v.rassovskyi@uhe.gov.ua

У статті розглянуто технологічні похибки, що виникають у разі використання ємнісних сенсорів для вимірювання повітряного проміжку (ПП) в гідрогенераторах, зокрема ті, що зумовлені неточністю їхнього встановлення на машині. Основну увагу приділено аналізу похибки, викликаній перекосом площини електродів сенсора відносно твірної розточення осердя статора. Виявлено, що перекіс електродів може суттєво впливати на точність вимірювань, що зі свого боку впливає на ефективність та надійність роботи гідрогенератора.

Проведено детальну оцінку впливу цього перекосу на результати вимірювання за допомогою сенсора, який складається із системи з N компланарних паралельних стрічкових електродів, розташованих перпендикулярно до твірної розточення осердя. Розроблено розрахункову схему для кількісної оцінки похибки, що дає змогу визначити величину похибки з урахуванням аналітичних залежностей. Використано числові методи для оцінки впливу перекосу на точність вимірювань. Результати були отримані для сенсора, призначеного для капсульного гідрогенератора типу СГК538/160-70М. На основі отриманих результатів розроблено практичні рекомендації щодо зменшення впливу похибки від перекосу на точність вимірювання. Бібл. 11, рис. 6.

Ключові слова: гідрогенератор, повітряний проміжок між статором і ротором, вимірювання, ємнісний сенсор, перекіс площини сенсора, похибка.

Вступ і постановка завдання. У потужних гідрогенераторах (ГГ) величина повітряного проміжку (ПП) між обвідною полюсів ротора та розточенням осердя статора є критично важливою для забезпечення стабільної роботи машини. Навіть незначні відхилення ПП від установлених норм можуть суттєво вплинути на характеристики машини. Тому міжнародні та державні нормативні документи [1, 2] вимагають, щоб ПП у ГГ у діаметрально протилежних точках розточення осердя статора ГГ відрізнялися один від одного не більше ніж на $\pm 20\%$ у разі, якщо заводськими інструкціями не передбачені більш жорсткі норми. Суворе дотримання вимог під час виготовлення, монтажу та експлуатації гідрогенератора дає змогу підвищити надійність та довговічність машини. Усе це викликає актуальну необхідність автоматичного вимірювання ПП як у процесі експлуатації, так і під час оглядів та ремонтів.

На сьогодні завдання достовірного контролю ПП у світовій практиці вирішується здебільшого використанням електронних ємнісних вимірювачів із сенсорами у вигляді плоских пластин, які встановлюються на розточення осердя статора [3]. Ємнісні вимірювачі ПП мають відносно високі метрологічні характеристики, їхні сенсори нечутливі до впливу потужних магнітних полів, а діапазон робочих температур залежать тільки від характеристик матеріа-



лів, із яких вони виготовлені. Ємнісні сенсори легко піддаються розрахунку та відтворенню, зокрема в разі масового та серійного виробництва, нескладні у виготовленні та налагодженні. Достатня інформативність контролю ПП із використанням системи ємнісних сенсорів, особливо для машин з великими діаметрами розточення осердя статора (насамперед для контролю відхилення форми розточення) досягається завдяки встановленню необхідної кількості сенсорів. Найвідоміші світові компанії, які серійно випускають ємнісні вимірювачі ПП для ГГ: VibroSystem (Канада) [4, 5], Bently Nevada (США) [6], Iris Power (Канада, США) [7], Meggitt SA (Швейцарія) [8].

Ємнісні сенсори ПП за своєю конструкцією є довгими тонкими плоскими пластинами, які встановлюються на внутрішню поверхню осердя статора. Під час встановлення ємнісного сенсора ПП на осерді потрібно стежити за тим, щоб площа сенсора, звернена до полюсів ротора, була паралельною твірній розточення осердя статора, запобігаючи в такий спосіб перекосу.

Аналіз наявних науково-технічних джерел показав, що вищезазначені зарубіжні компанії обмежуються публікацією технічних характеристик сенсорів, без публікації даних щодо оцінки впливу похибок на результати вимірювань повітряного проміжку. Для сенсорів ПП у ГГ, створених в Інституті електродинаміки НАН України [3, 9, 10], проводилась оцінка впливу похибки, зумовленої перекосом площини електродів сенсора відносно твірної розточення осердя статора на результат вимірювання для сенсорів зі стрічковими компланарними електродами. Було встановлено, що похибка від перекосу є значною, і під час встановлення сенсорів на осерді статора для її зменшення необхідно дотримуватись спеціальних вимог. Тому актуальним є завдання мінімізації впливу похибки через перекоп на результати вимірювання ПП у ГГ. Це можна реалізувати шляхом вдосконалення конструкції ємнісного сенсора, а саме застосувавши замість стрічкових електродів систему компланарних електродів.

Метою роботи є розрахунок похибки ємнісного сенсора повітряного проміжку в гідрогенераторах із системою компланарних електродів, зумовленої перекосом площини електродів сенсора відносно твірної розточення осердя статора.

Основна частина. У роботі [11] запропоновано конструкцію ємнісного сенсора ПП у потужних ГГ, який є розвитком теорії і практики побудови ємнісних вимірювачів ПП, створених в ІЕД НАН України. Він має високу точність вимірювання завдяки усуненню впливу крайових ефектів, а також кривизни полюсів ротора. Схему вимірювання ПП зазначеним сенсором показано на рис. 1, де: 1 – ємнісний сенсор із системою електродів, 2 – розточення осердя статора ГГ, 3 – полюс ротора. Зі зміною відстані d_{VAR} між загальною площиною електродів сенсора і заземленою поверхнею полюса ротора змінюється електрична ємність C_{VAR} між електродами сенсора.

До складу сенсора (рис. 2) входять стрічкові, паралельні між собою і перпендикулярні твірній розточення осердя статора високопотенціальні електроди 1, низькопотенціальні електроди 2 та додатковий заземлений електрод 3.

Додатковий електрод 3 розташований навколо високопотенціальних і низькопотенціальних електродів та між ними. Електроди 1, 2 і 3 розміщені в одній площині й відокремлені один від одного діелектричними проміжками 4. Усі електроди утворені тонким металевим шаром (наприклад, міді), нанесеним на плоску діелектричну пластину. Інформативною ємністю про величину ПП є ємність C_{12} між системою електродів 1 і 2, яка змінюється зі зміною відстані між загальною площиною електродів 1, 2 і 3 та поверхнею полюса ротора (рис. 1). Як показано в [11], ця ємність визначається формулою

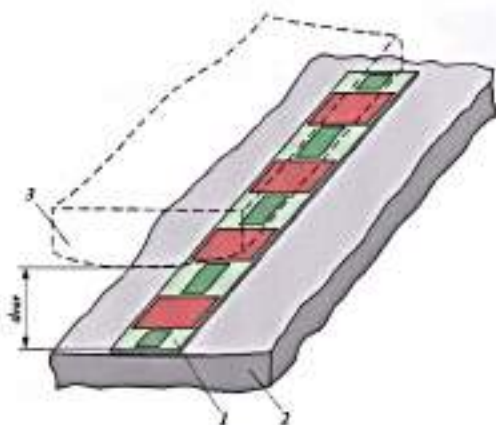


Рис. 1. Схема вимірювання ПП в ГГ

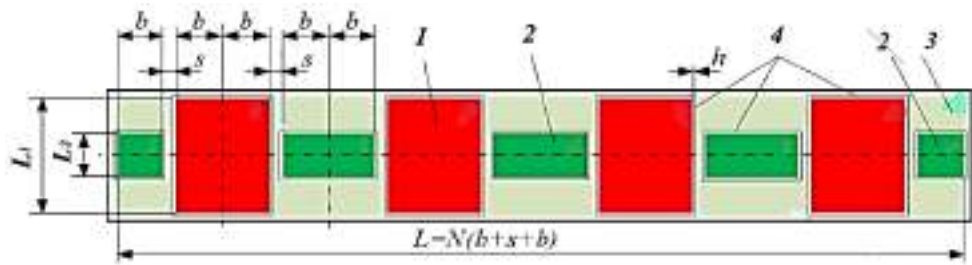


Рис. 2. Загальний вид ємнісного сенсора ПП в ГГ

$$C_{12} = N \cdot L_2 \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{\pi} \ln \frac{\left(\operatorname{th} \frac{\pi s}{4d} + \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d} \right)^2}{4 \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d} \operatorname{th} \frac{\pi s}{4d}}, \quad (1)$$

де $\varepsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – діелектрична проникність вакууму; ε_r – відносна діелектрична проникність повітря, b – ширина високопотенціального та низькопотенціального електродів, s – відстань між електродами 1 і 2, L_2 – довжина низькопотенціального електрода 1, d – відстань між загальною площиною електродів 1, 2, 3 і полюсом ротора 7, N – кількість елементарних сенсорів, утворених електродами 1 і 2 у разі паралельного з'єднання.

Для визначення похибки, зумовленої перекосом загальної площини електродів сенсора відносно твірної розточення осердя статора, складемо розрахункову схему (рис. 3). Приймемо деякі допущення, які спростують розрахунок, але не впливають на результат визначення похибки: а) поверхня полюса ротора є плоскою; б) оскільки перекіс двох площин є параметром відносним, то перекошеною нехай буде поверхня полюса ротора.

У початковому положенні (без перекосу) поверхня полюса є паралельною площині електродів сенсора і знаходиться від неї на відстані d . Із виникненням перекосу поверхня полюса ротора повернеться відносно своєї сторони М на кут α .

Введемо систему координат XOY , помістимо центр O в середню точку 1-го низькопотенціального електрода 2, вісь X спрямуємо вдовж сторони L_2 , а вісь Y – вдовж середньої лінії системи електродів сенсора. Виберемо i -й елементарний сенсор, утворений $1i$ -тим елементарним високопотенціальним електродом і $2i$ -тим низькопотенціальним електродом (на рис. 3 – область, обмежена точками A, C, D, B). Точка O_1 – геометричний центр i -го елементарного сенсора. Координата лінії розподілу $1i$ -го і $2i$ -го сенсорів за віссю

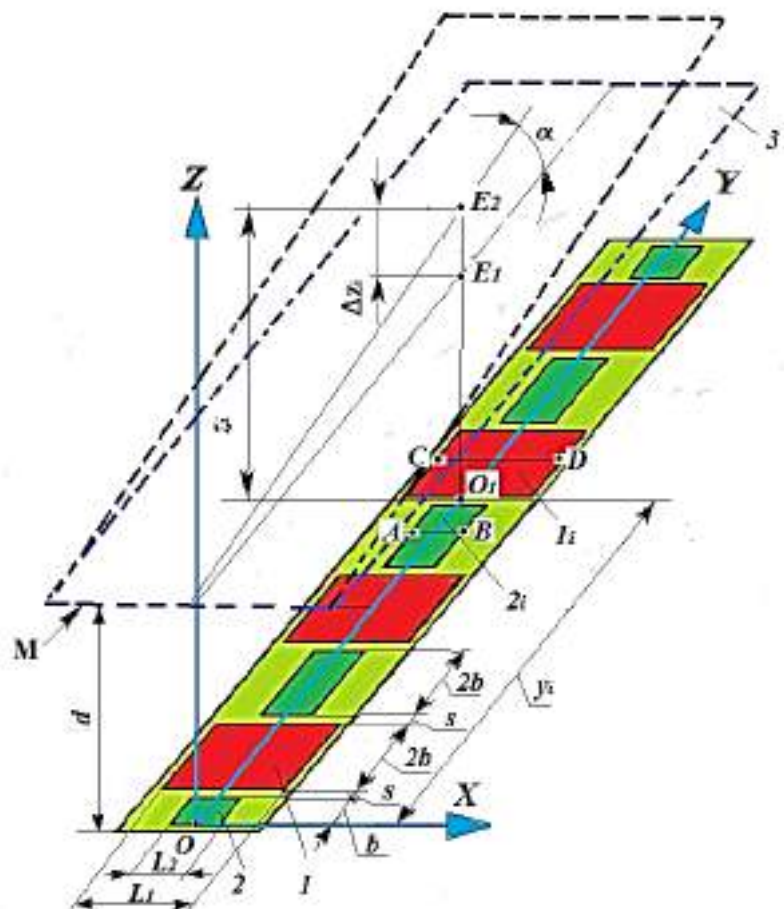


Рис. 3. Розрахункова схема аналітичного визначення впливу перекосу

$OY - y_i$. За відсутності перекосу ємність C_{1i2i} i -го елементарного сенсора складе

$$C_{1i2i} = L_2 \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{\pi} \ln \frac{\left(\operatorname{th} \frac{\pi s}{4d} + \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d} \right)^2}{4 \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d} \operatorname{th} \frac{\pi s}{4d}}. \quad (2)$$

Водночас загальна ємність системи із N елементарних сенсорів складе

$$C_{12} = NL_2 \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{\pi} \ln \frac{\left(\operatorname{th} \frac{\pi s}{4d} + \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d} \right)^2}{4 \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d} \operatorname{th} \frac{\pi s}{4d}}. \quad (3)$$

Із виникненням перекосу ємність i -го елементарного сенсора зміниться й дорівнюватиме

$$C_{1i2i\Pi} = L_2 \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{\pi} \ln \frac{\left(\operatorname{th} \frac{\pi s}{4z_i} + \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4z_i} \right)^2}{4 \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4z_i} \operatorname{th} \frac{\pi s}{4z_i}}, \quad (4)$$

де $z_i = d + y_i \operatorname{tg} \alpha$ – відстань від центру елементарного i -го сенсора до перекошеної площини 3 полюса ротора.

Із рис. 3 видно, що для елементарного i -го сенсора $y_i = N_i(s+2b)$. Тоді $z_i = d + y_i \operatorname{tg} \alpha = d + N_i(s+2b) \operatorname{tg} \alpha$. У такому випадку формула (4) набуде вигляду

$$C_{1i2i\Pi} = L_2 \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{\pi} \ln \frac{\left(\operatorname{th} \frac{\pi s}{4[d_0 + N_i(s+2b) \operatorname{tg} \alpha]} + \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4[d_0 + N_i(s+2b) \operatorname{tg} \alpha]} \right)^2}{4 \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4[d_0 + N_i(s+2b) \operatorname{tg} \alpha]} \operatorname{th} \frac{\pi s}{4[d_0 + N_i(s+2b) \operatorname{tg} \alpha]}}. \quad (5)$$

Із урахуванням того, що в системі є N елементарних сенсорів, загальна ємність $C_{12\Pi}$ системи із виникненням перекосу буде дорівнювати

$$C_{12\Pi} = L_2 \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{\pi} \sum_1^N \ln \frac{\left(\operatorname{th} \frac{\pi s}{4[d_0 + N_i(s+2b) \operatorname{tg} \alpha]} + \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4[d_0 + N_i(s+2b) \operatorname{tg} \alpha]} \right)^2}{4 \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4[d_0 + N_i(s+2b) \operatorname{tg} \alpha]} \operatorname{th} \frac{\pi s}{4[d_0 + N_i(s+2b) \operatorname{tg} \alpha]}}. \quad (6)$$

Відносна різниця між ємностями C_{12} і $C_{12\Pi}$, яка є похибкою вимірювання ПП, внесеною перекосом, буде дорівнювати

$$\delta_{\Pi} = \frac{C_{12\Pi} - C_{12}}{C_{12}} \cdot 100\% =$$

$$= \frac{\sum_1^N \ln \frac{\left(\operatorname{th} \frac{\pi s}{4(d + N_i[s+2b] \operatorname{tg} \alpha)} + \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4(d + N_i[s+2b] \operatorname{tg} \alpha)} \right)^2}{4 \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4(d + N_i[s+2b] \operatorname{tg} \alpha)} \operatorname{th} \frac{\pi s}{4(d + N_i[s+2b] \operatorname{tg} \alpha)}} - N \ln \frac{\left(\operatorname{th} \frac{\pi s}{4d} + \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d} \right)^2}{4 \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d} \operatorname{th} \frac{\pi s}{4d}}}{N \ln \frac{\left(\operatorname{th} \frac{\pi s}{4d} + \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d} \right)^2}{4 \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d_0} \operatorname{th} \frac{\pi s}{4d}}} \cdot 100\% =$$

$$= \left\{ \frac{\sum_{i=1}^N \ln \left(\frac{\operatorname{th} \frac{\pi s}{4[d + N_i(s+2b)\operatorname{tg}\alpha]} + \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4[d + N_i(s+2b)\operatorname{tg}\alpha]}}{4 \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4[d + N_i(s+2b)\operatorname{tg}\alpha]} \operatorname{th} \frac{\pi s}{4[d + N_i(s+2b)\operatorname{tg}\alpha]}} \right)}{N \ln \left(\frac{\left(\operatorname{th} \frac{\pi s}{4d} + \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d} \right)^2}{4 \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d} \operatorname{th} \frac{\pi s}{4d}} \right)} - 1 \right\} \cdot 100\% \quad (7)$$

Використовуючи формулу (7), визначимо кількісну величину похибки від перекосу для сенсора ПП, створеного для застосування на капсульному ГГ типу СГК538/160-70М. Розміри сенсора: $b = 12$ мм – ширина високопотенціального та низькопотенціального електродів, $s = 2$ мм – відстань між електродами 1 і 2, L_2 – довжина низькопотенціального електрода 1, $N = 8$ – кількість елементарних сенсорів, утворених електродами 1 і 2 у разі паралельного з'єднання. Розрахунок зроблено для номінального зазору $d = 6$ мм у діапазоні кута перекосу $0 \leq \alpha \leq 0,003$.

Рис. 4 ілюструє залежність $\delta_{\Pi} = f(\operatorname{tg}\alpha)$.

Як видно з рис. 4, похибка від перекосу сенсора ПП із системою електродів, перпендикулярних твірній розточення статора, запропонованого в [11], у 2 рази менша, ніж аналогічна похибка сенсора із двома паралельними електродами, паралельними твірній розточення осердя [9,10]. Але водночас є досить значною. Тому під час встановлення сенсора на розточенні осердя необхідно вживати заходів задля її зменшення. Передусім для кожного сенсора після встановлення необхідно провести вимірювання значення реального перекосу за допомогою годинникових індикаторів, як показано на рис. 5. Для цього необхідно виміряти відстані між площиною електродів сенсора 1 і поверхнею 2 розточення осердя, який є частиною розточення осердя.

Середньоарифметичне значення вимірюваних величин дасть константу сенсора, яка враховується під час юстування приладу, а різниця – величину перекосу s у долях міліметра. Знаючи середнє значення s , можна розрахувати коригувальне виправлення, обумовлене перекосом, і внести його величину в результат вимірювання, враховуючи, що $s/L = \operatorname{tg}\alpha \cong \alpha$, де L – довжина сенсора (рис. 6).

Висновки. У результаті проведеного дослідження встановлено, що застосування сенсора повітряного проміжку із системою низькопотенціальних і високопотенціальних електродів, перпендикулярних твірній розто-

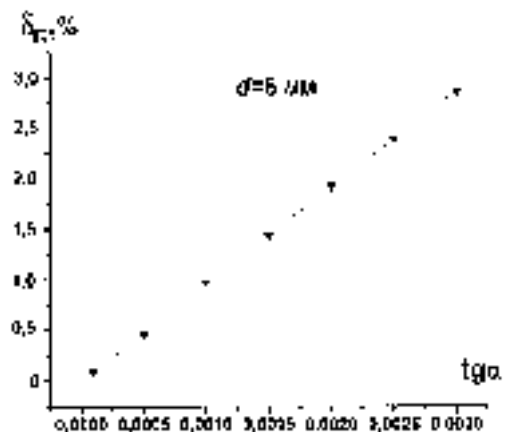


Рис. 4. Графік величини похибки ємнісного сенсора ПП, зумовленої перекосом

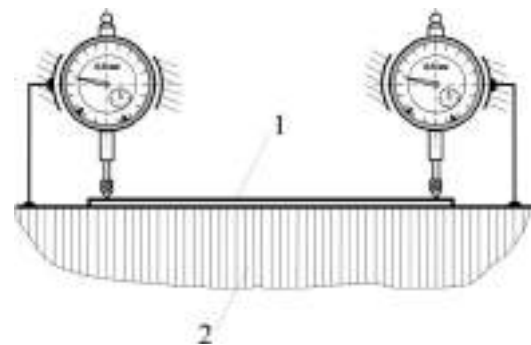


Рис. 5. Контроль величини перекосу ємнісного сенсора ПП під час встановлення на розточенні осердя статора

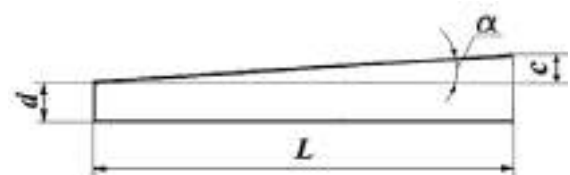


Рис. 6. Схема розрахунку коригувального виправлення похибки, зумовленої перекосом площини

чення осердя статора гідрогенератора, порівняно із сенсорами, в яких електроди паралельні твірній розточення, зменшує похибку, зумовлену перекосом площини сенсора відносно твірної розточення осердя статора в 2 рази.

Робота виконана за держбюджетною темою «Розширення функціональних можливостей та підвищення метрологічних характеристик засобів вимірювання в системах моніторингу і діагностування в електроенергетиці», шифр «ПАРАМЕТР-Д», реєстраційний номер (0122U000136) та проектом Національного фонду досліджень України «Моделі і засоби підвищення ефективності роботи гідро- та гідроакumuлюючих електростанцій для балансування ОЕС України в умовах ринку електричної енергії та особливих технологічних обмежень» з виконання наукових досліджень і розробок «Наука для відбудови України у воєнний та повоєнний періоди» (номер 2022.01/0069).

1. ISO 19283:2020 (E). Condition monitoring and diagnostics of machines. Hydroelectric generating units. ISO copyright office: Geneva, Switzerland, 2020. 70 p.
2. СОУ-Н ЕЕ 20.302:2020. Норми випробування електрообладнання. Міністерство енергетики та захисту довкілля України. Офіційне видання ПрАТ "НЕК "Укренерго". 238 с.
3. Левицький А.С., Федоренко Г.М., Грубой О.П. Контроль стану потужних гідро- та турбогенераторів за допомогою ємнісних вимірювачів параметрів механічних дефектів. Київ: Ін-т електродинаміки НАН України, 2011. 242 с.
4. Air Gap monitoring (Rotor/Stator). VM™ Air Gap. URL: https://www.vibrosystem.com/en/product/vm_air_gap. (accessed: 13.07.2024).
5. VM3 & VM5 Airflow For Capacitive Air Gap Measuring Chains. URL: <https://library.vibrosystem.com/en/Datasheets/9628-25D6A-110.pdf>. (accessed: 13.07.2024).
6. 4000 Series Air Gap Sensor System. Datasheet. Bently Nevada Machinery Condition Monitoring.. URL: <https://dam.bakerhughes.com/m/4dfdaa01abf81f67/original/4000-Series-Air-Gap-Sensor-System-Datasheet-167885-pdf.pdf>. (accessed:13.07.2024).
7. Iris Power AGTracII. URL: <https://irispower.com/wp-content/uploads/2016/11/Iris-Power-Air-Gap-Condition-Monitoring-AGTracII-Brochure.pdf>. (accessed: 13.07.2024).
8. LS121 and ILS731 air-gap measurement system. URL: https://catalogue.meggittsensing.com/wp-content/uploads/2020/12/DS_LS121_ILS731-en.pdf. (accessed: 13.07.2024).
9. Левицький А.С., Зайцев Є.О., Кромпляс Б.А. Ємнісний сенсор для вимірювання повітряного зазору в генераторах. Патент України на винахід № 115924, 2018.
10. Левицький А.С., Зайцев Є.О., Кромпляс Б.А. Похибки ємнісного сенсора зазору в гідрогенераторі. *Праці Інституту електродинаміки НАНУ*. 2016. Вип. 44. С. 50–55.
11. Левицький А.С., Рассовський В.Л., Зайцев Є.О. Ємнісний сенсор з системою компланарних електродів для вимірювання повітряного зазору в гідрогенераторах. *Технічна електродинаміка*. 2023. №. 3. С. 80–85. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2023.03.080>

CALCULATION OF PLATE SKEW ERROR OF THE AIR GAP CAPACITIVE SENSOR IN HYDROGEN GENERATORS WITH A SYSTEM OF COPLANAR ELECTRODES

A. S. Levitskyi¹, Ie. O. Zaitsev¹, V. L. Rassovskyi², S.A. Zakusilo¹

1 – Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Beresteyskyi ave., 56, Kyiv, 03680, Ukraine

e-mail: levitskiyanatoliymail@gmail.com, zaitsev@i.ua, sergy_zakusilo@i.ua

2 – PJSC "Ukrhydroenergo", Vyshhorod, 07300, Ukraine

e-mail: v.rassovskyi@uhe.gov.ua

In this paper calculating the technological errors that arise when using capacitive sensors to measure the air gap (AG) in hydrogen generators, in particular, those caused by the inaccuracy of their installation on the machine. The results of the analysis of the error caused by the skew of the plane of the sensor electrodes relative to the constructive boring of the stator core are given. It was found that the skew of the electrodes could significantly affect the accuracy of the measurements, which in turn affects the efficiency and reliability of the hydrogen generator. A detailed assessment of the influence of this skew on the measurement results was carried out using a sensor consisting of a system of N coplanar parallel strip electrodes located perpendicular to the core boring. A calculation scheme has been developed for the quantitative assessment of the error, which allows determining the value of the error taking into account analytical dependencies. Numerical methods were used to assess the influence of skew on the accuracy of measurements, and the results were obtained for a sensor designed for a capsule hydrogen generator of the SGK538/160-70M type. Based on the obtained results, practical recommendations have been developed to reduce the impact of skew error on measurement accuracy. Ref. 11, fig. 6.

Key words: hydrogen generator, air gap between stator and rotor, measurement, capacitive sensor, skew of the sensor plane, error.

1. ISO 19283:2020 (E). Condition monitoring and diagnostics of machines. Hydroelectric generating units. ISO copyright office: Geneva, Switzerland, 2020. 70 p.
2. SOU-N EE 20.302:2020. Norms of electrical equipment testing. Ministry of Energy and Environmental Protection of Ukraine. Publication of PJSC NEC Ukrenergo. 238 p. (Ukr)
3. Levitsky A.S., Fedorenko H.M., Gruboy O.P. Control of the state of powerful hydro- and turbogenerators with the help of capacitive meters of parameters of mechanical defects. Kyiv: Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2011. 242 p. (Ukr)
4. Air Gap monitoring (Rotor/Stator). VMTM Air Gap. URL: https://www.vibrosystm.com/en/product/vm_air_gap (accessed 13.07.2024)
5. VM3 & VM5 Airflow For Capacitive Air Gap Measuring Chains. URL: <https://library.vibrosystm.com/en/Datasheets/9628-25D6A-110.pdf>
6. 4000 Series Air Gap Sensor System. Datasheet. Bently Nevada Machinery Condition Monitoring. URL: <https://dam.bakerhughes.com/m/4dfdaa01abf81f67/original/4000-Series-Air-Gap-Sensor-System-Datasheet-167885-pdf.pdf> (accessed at 13.07.2024)
7. Iris Power AGTracII. [Online]. Available: <https://irispower.com/wp-content/uploads/2016/11/Iris-Power-Air-Gap-Condition-Monitoring-AGTracII-Brochure.pdf> (accessed: 13.07.2024)
8. LS121 and ILS731 air-gap measurement system. [Online]. Available: https://catalogue.meggittsensing.com/wp-content/uploads/2020/12/DS_LS121_ILS731-en.pdf (accessed: 13.07.2024)
9. Levytskyi A.S., Zaitsev I.O., Kromplyas B.A. Capacitive sensor for measuring the air gap in generators. Patent UA No. 115924, 2018. (Ukr)
10. Levitsky A.S., Zaitsev I.O., Kromplyas B.A. Errors of the capacitive gauge in the hydrogenerator. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2016. Vol. 44. Pp. 50–55. (Ukr)
11. Levytskyi A.S., Rassovskyi V.L., Zaitsev I.O. A capacitive sensor with a system of coplanar electrodes for measuring the air gap in hydrogen generators. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2023. No. 3. Pp. 80–85. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2023.03.080> (Ukr)

Надійшла: 14.08.2024

Прийнята: 04.09.2024

Submitted: 14.08.2024

Accepted: 04.09.2024