



ISSN 1727-9895

ISSN 2786-7064 (online)

# **Праці**

## **Інституту електродинаміки**

## **Національної академії наук**

## **України**

**Збірник наукових праць**

**Випуск**

**63**

**Київ**

**2022**

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  
63**

Київ  
2022

## ПРАЦІ ІНСТИТУТУ ЕЛЕКТРОДИНАМІКИ НАН УКРАЇНИ

### Редакційна колегія\*:

|                     |                                                |
|---------------------|------------------------------------------------|
| <b>Шаповал І.А.</b> | <b>головний редактор,<br/>докт. техн. наук</b> |
| Кириленко О.В.      | академік НАН України                           |
| Стогній Б.С.        | академік НАН України                           |
| Шидловський А.К.    | академік НАН України                           |
| Жаркін А.Ф.         | 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                          |
| Щерба А.А.          | член-кор. НАН України                          |
| Буткевич О.Ф.       | докт. техн. наук                               |
| Васецький Ю.М.      | докт. техн. наук                               |
| Кенсицький О.Г.     | докт. техн. наук                               |
| Липківський К.О.    | докт. техн. наук                               |
| Мислович М.В.       | докт. техн. наук                               |
| Мельник В.Г.        | докт. техн. наук                               |
| Петухов І.С.        | докт. техн. наук                               |

### Editorial board\*:

|                      |                                                            |
|----------------------|------------------------------------------------------------|
| <b>I.A. Shapoval</b> | <b>Editor-In-Chief,<br/>Doctor of engineering sciences</b> |
| 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.F. Zharkin         | Corresponding Member 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                 |
| A.A. Shcherba        | 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                             |
| M.V. Myslovych       | Doctor of engineering sciences                             |
| V.G. Melnyk          | Doctor of engineering sciences                             |
| I.C. 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.dsplace.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 № 9 від 10 листопада 2022 року*

Зареєстровано 07.02.2002. Свідоцтво: серія КВ, № 5843.  
Засновник та видавець: Інститут електродинаміки НАН України  
Україна, 03057, м. Київ, пр. Перемоги, 56

### Адреса редакції:

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

ISSN 1727-9895

ISSN 2786-7064 (online)

© Інститут електродинаміки НАН України, 2022

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

**Праці  
Інституту електродинаміки  
Національної академії наук України**

**Випуск 63**

**2022 р.**

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2022.63>

**ЗМІСТ**

**ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНІ СИСТЕМИ ТА РИНКИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ**

**Кириленко О.В., Блінов І.В., Зайцев Є.О., Палачов С.О., Васильченко В.І.**  
Впровадження міжнародних та європейських стандартів для розвитку ОЕС України  
згідно з концепцією Smart Grid .....5

**Жаркін А.Ф., Палачов С.О., Попов В.А., Ткаченко В.В., Фролов І.В.**  
Загальні вимоги до побудови та використання гібридних мікросистем  
в розподільних мережах.....13

**Pavlovsky V.V., Lukianenko L.M., Steliuk A.O., Horoshko P.S.**  
Quasi-dynamic model of the interconnected power system of Ukraine for  
a frequency stability study .....22

**ТЕОРЕТИЧНА ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОФІЗИКА**

**Щерба А.А., Супруновська Н.І., Щерба М.А., Розіскулов С.С., Михайленко В.В.**  
Залежність динамічних характеристик імпульсних струмів електророзрядних установок  
від віддаленості їхнього технологічного навантаження ..... 26

**ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ ТА АПАРАТИ**

**Kireyev V.G., Akinin K.P.**  
Features of the development of slotless brushless magnetoelectric torque motors .....31

**Головань І.В., Попович О.М., Поліщук В.О.**  
Засоби проектного синтезу занурених асинхронних двигунів інноваційних конструкцій.....40

**Кучинський К.А., Крамарський В.А.**  
Розрахункова оцінка вібропереміщень і механічних напружень ізоляції лобової  
частини обмотки статора потужного турбогенератора.....45

**НАПІВПРОВІДНИКОВІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ**

**Губаревич В.М., Маруня Ю.В., Кабан В.П., Матвеев В.Ю.**  
Симетричні індуктивно-ємнісні перетворювачі з однофазним мостовим випрямлячем,  
активним навантаженням та ємнісним фільтром .....52

**Чиженко О.І., Рибіна О.Б.**  
Дослідження перехідних процесів у колі умовно дванадцятифазного тиристорного  
компенсатора для корекції перехідних пускових режимів в електричній мережі .....58

## CONTENTS

## ELECTRIC POWER SYSTEMS AND ELECTRICITY MARKETS

*Kyrylenko O.V., Blinov I.V., Zaitsev I.O., Palachov S.O., Vasylchenko V.I.*

International and european standards implementation for uses Smart Grid concept in IPS of Ukraine .....5

*Zharkin A., Palachov S., Popov V., Tkachenko V., Frolov I.*

General requirements for the construction and operation of hybrid microgrids in distribution networks .....13

*Pavlovsky V.V., Lukianenko L.M., Steliuk A.O., Horoshko P.S.*

Quasi-dynamic model of the interconnected power system of Ukraine for a frequency stability study .....22

## THEORETICAL ELECTRICAL ENGINEERING

*Shcherba A.A., Suprunovska N.I., Shcherba M.A., Roziskulov S.S., Mihaylenko V.V.*

Dependence of dynamic characteristics of pulse currents of electrical discharge installations on the distance of their technological load .....26

## ELECTRICAL MACHINES AND APPARATUS

*Kireyev V.G., Akinin K.P.*

Features of the development of slotless brushless magnetoelectric torque motors .....31

*Golovan I.V., Popovych O.M., Polishchuk V.O.*

The design synthesis tools of submersible induction motors of innovative constructs .....40

*Kuchynskyi K.A., Kramarsky V.A.*

Calculated assessment of vibration movements and mechanical stresses of insulation front part of the stator winding of the powerful turbogenerator .....45

## SEMICONDUCTOR CONVERTERS

*Gubarevich V.M., Marunya Yu.V., Kaban V.P., Matveev V.Yu.*

Symmetric inductive-capacitive converters with single-phase bridge rectifier, active loads and capacitive filter .....52

*Chyzhenko O.I., Rybina O.B.*

Study of transient processes in the circuit of a conditionally-twelvephase thyristor compensator for the correction of transient start-up modes in the electrical network .....58

Відповідальний секретар С.В. Гаврилюк

Редактор Ю.В. Морозова-Леонова

## ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНІ СИСТЕМИ ТА РИНКИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

УДК 621.311:681.3

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2022.63.005>

### ВПРОВАДЖЕННЯ МІЖНАРОДНИХ ТА ЄВРОПЕЙСЬКИХ СТАНДАРТІВ ДЛЯ РОЗВИТКУ ОЕС УКРАЇНИ ЗГІДНО З КОНЦЕПЦІЄЮ SMART GRID

О.В. Кириленко<sup>1\*</sup>, акад. НАН України, І.В. Блінов<sup>1\*\*</sup>, докт. техн. наук, Є.О. Зайцев<sup>1\*\*\*</sup>, докт. техн. наук, С.О. Палачов<sup>1\*\*\*\*</sup>, канд. техн. наук, В.І. Васильченко<sup>2</sup>

<sup>1</sup> – Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна

<sup>2</sup> – НЕК Укренерго,  
вул. Симона Петлюри, 25, Київ, 01032, Україна  
e-mail: [blinovigor81@gmail.com](mailto:blinovigor81@gmail.com)

*Розглянуто передумови та визначено основні цілі вдосконалення нормативної бази України задля розвитку електричних мереж згідно з концепцією Smart Grid та Концепцією впровадження “розумних мереж” в Україні до 2035 року. Обґрунтовано доцільність розроблення національної стратегії з впровадження міжнародних та європейських стандартів для розвитку ОЕС України. Сформовано мету та основні задачі стратегії, що полягають у застосуванні системного підходу до визначення, впровадження та актуалізації пріоритетних міжнародних та європейських стандартів, що дасть змогу забезпечити сталий та синхронізований розвиток ОЕС України згідно з концепцією SmartGrid. Розглянуто основні напрями реалізації Стратегії з впровадження міжнародних та європейських стандартів для розвитку ОЕС України згідно з концепцією Smart Grid. Бібл. 22.*

**Ключові слова:** електроенергетична система, Smart Grid, Міжнародна електротехнічна комісія, стандартизація.

**Вступ.** Останніми роками важливою частиною політики ЄС у галузі енергетики є комплекс заходів, що об’єднується терміном «Енергетичний перехід», у межах якого провідними країнами передбачено сталий характер розвитку економіки, де кінцевою метою є досягнення до 2050 року кліматично-нейтрального статусу Європи шляхом суттєвого зниження використання вугілля та інших невідновлюваних енергоресурсів [1-3]. Це означає суттєву зміну у європейській енергетичній політиці, зокрема, і її переорієнтацію від попиту до пропозиції та заміщення традиційної централізованої генерації розосередженою генерацією, а також уникнення зайвого виробництва та споживання енергії за рахунок енергозберігаючих заходів та зростання енергоефективності.

На сьогодні суть енергетичної стратегії ЄС полягає у забезпеченні гарантії щодо постачання енергетичних ресурсів за доступними цінами у безперервному режимі. З цією метою у ЄС у 2014 р. прийнято одну з базових основ стратегії Енергетичного союзу – Стратегію енергетичної безпеки ЄС, головними напрямами якої стали:

- застосування широкого спектру доступних паливних ресурсів та суттєве зменшення частки викопних видів палива в енергетичному балансі ЄС (декарбонізація економіки);
- диверсифікація зовнішніх джерел та постачальників паливних ресурсів і шляхів їхнього постачання;
- розбудова належно функціонуючого енергетичного та повністю інтегрованого внутрішнього ринку;
- належна потужність енергогенерувальних та передавальних підприємств, надійність та стійкість енергомереж, їхній розвиток та розширення з’єднань з енергомережами інших регіонів/країн;



– зниження обсягів енергоспоживання різних груп споживачів на основі впровадження енергоефективних заходів та переходу на альтернативні джерела енергії.

З метою ефективної реалізації напрямів енергетичної стратегії ЄС також у 2019 р. Єврокомісія офіційно затвердила Четвертий енергетичний пакет «Чиста енергія для усіх європейців» (Clean energy for all Europeans package) [3], що містить вісім директивних документів, які визначають обов'язкові вимоги до організації внутрішніх та загальноєвропейських ринків енергії. Зазначені документи відображають бачення того, за яким сценарієм ЄС здійснюватиме перехід до нового енергетичного майбутнього. У цілому документами Четвертого енергопакету визначено три основні цілі: досягнення глобального лідерства в сфері відновлюваних джерел енергії, забезпечення кращих умов для споживачів, пріоритетність енергоефективності. Прийняття в Євросоюзі вказаних документів мало безпосередній вплив на перегляд та уточнення пріоритетів у сучасній енергетичній політиці України.

Таким чином, Енергетична Стратегія України (ЕСУ) до 2035 року «Безпека, Енергоефективність, Конкурентоспроможність» була скорегована з урахуванням останніх змін та основних напрямків сучасної європейської енергетичної стратегії. У результаті реалізації завдань, передбачених Енергетичною стратегією України, до 2035 р. планувалось, зокрема, досягнути зниження енергоємності ВВП більш ніж у два рази та збільшити використання відновлюваних джерел енергії до рівня 25 % від обсягів загального первинного постачання енергії.

Для реалізації задач ЕСУ передбачено здійснити перехід в Україні від традиційної системи електропостачання з генеруючими станціями великої потужності, що застосовують викопне паливо, до принципово нової моделі побудови системи електропостачання на основі технології Smart Grid [4, 5], яка характеризується масштабним застосуванням відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), залученням широкого кола користувачів (як виробників електричної енергії, так і її споживачів) до процесів керування режимами системи електропостачання і, як наслідок, активним обміном даними між її об'єктами [6].

Для забезпечення досягнення цілей ЕСУ Міністерство енергетики України розробило «Концепцію впровадження “розумних мереж” в Україні до 2035 року» [7], в якій:

- розтлумачено поняття «розумних мереж»;
- визначено загальні напрямки впровадження і використання технологій «розумних мереж» в енергетичному секторі України;
- встановлено пріоритети і основні механізми реалізації;
- встановлено етапи і коло ключових учасників впровадження технологій «розумних мереж».

У цій Концепції зазначено, що платформа просування «розумних мереж» в Україні спирається на готовий набір технологій і заходів, визначених у європейських та міжнародних стандартах, які формулюють технологічні рішення реалізації для кожного компонента енергетичного сектора (генерації електроенергії, її транспортування, розподілу, управління розподіленими ресурсами тощо), а також готовий набір телекомунікаційних та інформаційних протоколів, що сприяють реалізації цих технологій.

Існуючий курс Концепції впровадження “розумних мереж” в Україні до 2035 року, направлений на активний розвиток систем Smart Grid в енергетичній системі України, повністю відповідає пріоритетним напрямкам розвитку енергетики в ЄС, а також задачам, які потребують розв'язку за умови синхронної роботи ОЕС України та ENTSO-E.

У плані розвитку системи передачі на 2021–2030 роки, розробленому НЕК «Укренерго» і схваленому Постановою НКРЕКП №57 від 20.01.2020, впровадження в Україні концепції «розумних мереж» вважається основним перспективним напрямком розвитку системи передачі. Реалізація технології «розумних мереж» дасть змогу отримати для диспетчерського управління інструментарій, необхідний для виконання оперативних розрахунків надійності роботи енергосистеми, а також засоби для збору необхідного обсягу інформації для оперативного та поточного планування роботи.

Слід зазначити, що забезпечення подальшої синхронної роботи ОЕС України з європейською енергосистемою ENTSO-E, започаткованої фактично 28 лютого 2022 року, стійкості об'єднання мереж України та Європи є передумовою успішності майбутнього об'єднання і ринків електричної енергії [8, 9]. Інтеграція енергетики України до ринків ЄС та синхронна робота ОЕС України з ENTSO-E ускладнюється нерозвиненістю нормативної бази та значним відставання України в прийнятті сучасних європейських та міжнародних стандартів, відсутністю плану заходів щодо впровадження таких стандартів в Україні з розподілом за напрямками, недостатньою підтримкою участі України у роботі міжнародних організацій стандартизації ІЕС та CENELEC.

**Метою статті** є аналіз та визначення цілей розвитку нормативної бази задля розвитку електричних мереж ОЕС України згідно з концепцією Smart Grid на основі впровадження міжнародних та європейських стандартів.

Сьогодні Європейським комітетом зі стандартизації (CEN) і Європейським комітетом із стандартизації в сфері електротехніки (CENELEC) визначено технології і заходи для розвитку складових енергетичного сектора згідно із концепцією Smart Grid. Основним завданням в сфері стандартизації на базі концепції Smart Grid є забезпечення дотримання єдиних вимог щодо інформаційного обміну та комунікацій на всіх ієрархічних рівнях енергосистеми та ринку електричної енергії. Тому актуальним та вкрай важливим завданням, яке сьогодні стоїть в електроенергетичній сфері України, є реалізація заходів з прийняття сучасних європейських та міжнародних стандартів у сфері електроенергетики, що забезпечують розвиток та впровадження технологій Smart Grid.

Впровадження в Україні міжнародних та європейських стандартів, що стосуються концепції Smart Grid, є важливою частиною загального комплексу заходів, передбачених Енергетичною стратегією України на період до 2035 р., Концепцією впровадження «розумних мереж» до 2035 року в Україні та Планом розвитку системи передачі на 2021–2030 роки, спрямованих на забезпечення потреб суспільства та економіки в паливно-енергетичних ресурсах у технічно надійний, безпечний, економічно ефективний та екологічно прийнятний спосіб для гарантування поліпшення умов життєдіяльності суспільства.

Під час визначення пріоритетних напрямків розвитку нормативно-технічної бази України з метою сприяння впровадженню технології Smart Grid слід враховувати стратегічні цілі та актуальні задачі, які поставлено урядом перед електроенергетикою, а також оптимальні шляхи вирішення цих задач, що мають спиратися на реальні можливості економіки України.

Незважаючи на прогрес у галузі стандартизації України в цілому, ситуація із прийняттям сучасних стандартів у сфері електроенергетики є незадовільною, оскільки обсяг гармонізованих в Україні стандартів, виданих Європейським комітетом стандартизації в електротехніці та Міжнародною електротехнічною комісією, є вкрай недостатнім.

Проведений аналіз сучасного стану нормативно-технічної бази України, показав необхідність та доцільність забезпечення вирішення найбільш актуальних та першочергових задач, встановлених у проекті Концепції впровадження «розумних мереж» в Україні до 2035 року. Зокрема, аналіз сучасного стану справ щодо впровадження в Україні міжнародних стандартів ІЕС показав, що цей показник у відсотковому відношенні значно менший, ніж в країнах Європи. Відсутність згармонізованих стандартів для побудови елементів інфраструктури та обладнання електроенергетичної сфери є однією з основних причин наявності технічних бар'єрів у торгівлі між енергетичними ринками країн Європи та України, що обмежує перспективи взаємовигідного співробітництва між ними.

Повноцінна імплементація правил функціонування енергетики у відповідності до положень законодавства ЄС потребує забезпечення повноцінного представництва України в ІЕС та CENELEC.

Визначено, що нормативна база України, яка необхідна для забезпечення надійного та ефективного функціонування та розвитку систем передачі та розподілу України на основі концепції Smart Grid, має базуватися на національних законах і технічних регламентах, що є

забезпеченням імплементації європейських директивних документів, і складатися з національних стандартів, гармонізованих з європейськими Директивами Нового та Глобального підходу, які мають обов'язковий характер, а також стандартами, ідентичними міжнародним, але виконання яких має добровільний характер, обумовлений особливостями застосування певного обладнання для рішення конкретних задач. Крім того, в тих сферах застосування, де міжнародні стандарти відсутні, необхідним є прийняття національних стандартів та інших нормативних документів, зокрема, і стандартів організації та кодексів усталеної практики, що розроблені у відповідності до міжнародних рекомендацій.

Загальна кількість міжнародних стандартів, необхідних для повного впровадження усіх елементів концепції Smart Grid, перелік яких наведено в Технічному звіті IEC TR 63097:2017 «Smart grid standardization roadmap» [10, 11], складало більш ніж 450 станом на 2017 рік, і цей перелік постійно збільшується та оновлюється, що обумовлює необхідність впровадження плану заходів (дорожньої карти) з поступового впровадження необхідних документів у нормативну базу України в галузі енергетики, яка передбачає комплексний підхід під час прийняття нових стандартів та актуалізації або скасування вже існуючих. Насамперед слід звернути увагу на нормативно-технічне забезпечення реалізації тих функціональних систем Smart Grid, що необхідні для рішення найбільш актуальних та першочергових задач, встановлених в «Концепції впровадження “розумних мереж” в Україні до 2035 року». До переліку основних та оприлюднених документів, які доцільно використати як основу для побудови комплексної моделі інформаційного обміну на ринку електричної енергії, також належать і такі регламентуючі документи ENTSO-E, що не набули статусу міжнародних або європейських стандартів, але фактично регламентують процедури та формати інформаційного обміну в окремих сегментах або сферах ринку електричної енергії [12, 14].

За новими напрямками інноваційного розвитку в IEC створюються системні комітети і стратегічні робочі групи. З точки зору впровадження SmartGrid-технологій особливо слід виділити робочі групи SyC Smart Energy «Розумна енергетика» та SyC Smart Cities «Розумні міста». Головним завданням цих комітетів є забезпечення ефективної інтеграції електричних мереж, газорозподільних систем, систем централізованого теплопостачання та водопостачання, транспортних систем, розробка та впровадження відповідних стандартів у галузі SmartGrid-технологій, що обумовлює необхідність аналізу та впровадження відповідних міжнародних та європейських стандартів [15-20].

Метою Стратегії з впровадження міжнародних та європейських стандартів для розвитку ОЕС України згідно з концепцією Smart Grid є нормативно-технічне забезпечення сталого розвитку української енергетики в напрямку підвищення ефективності роботи системи електропостачання, покращенню умов інтеграції ВДЕ та розподіленої генерації, розвиток ОЕС України в умовах синхронної роботи з ENTSO-E та інтеграції ринку електричної енергії з ринками країн ЄС.

У результаті реалізації такої Стратегії була створена нормативна база України, яка має складатися з національних стандартів, ідентичних міжнародним, виконання яких є необхідною умовою забезпечення ефективного функціонування архітектури Smart Grid у цілому та сумісності її окремих компонентів. Крім того, мають розвиватися сфери застосування, що не охоплюються належним чином міжнародними стандартами, внаслідок чого необхідним є самостійне розроблення національних (або відомчих) стандартів та інших документів з урахуванням національних особливостей, але у відповідності до рекомендацій міжнародних органів зі стандартизації.

Основною задачею Стратегії є визначення пріоритетів щодо впровадження груп та окремих міжнародних та європейських стандартів, що дасть змогу забезпечити сталий та синхронізований розвиток електроенергетичної системи України згідно з концепцією SmartGrid, а також визначення найбільш доцільного способу їхнього впровадження (методом перекладу, підтвердження або передруку). Також важливими задачами Стратегії є:

- забезпечення уніфікації профільної науково-технічної термінології з загальноприйнятими міжнародними термінами в рамках загальної концепції Smart Grid, а також її конкретних функціональних систем;

– забезпечення системного підходу до створення нормативної бази, згідно з яким впровадження міжнародних та європейських стандартів має здійснюватися, наскільки можливо, у вигляді комплектів документів, що містять усі необхідні стандарти для забезпечення ефективної роботи відповідної функціональної системи в рамках архітектури SmartGrid;

– виконання умов офіційного партнерства CENELEC та національного органу стандартизації (НОС) України, яким з 2014 р. є державне підприємство “Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості” (ДП «УкрНДНЦ»), а саме скасування діючих національних стандартів України, які втратили актуальність та суперечать чинним європейським стандартам, що стосуються концепції Smart Grid;

– актуалізація вже впроваджених в Україні міжнародних стандартів з переліку, наведеному у IEC TR 63097:2017 «Smart grid standardization roadmap».

Для реалізації стратегії слід прийняти до уваги той факт, що технічний звіт IEC TR 63097:2017 відображає структуру системи міжнародних стандартів, що стосуються концепції SmartGrid, станом на 2017 рік. Тому серед задач Стратегії є відслідковування появи після 2017 р. нових міжнародних та європейських стандартів у даній галузі та аналіз доцільності їхнього впровадження в Україні. Зокрема, мова іде про стандарти, розроблювані робочими групами SyC Smart Energy «Розумна енергетика» та SyC Smart Cities «Розумні міста» [21]. Основними напрямками реалізації Стратегії є:

1) розроблення групи спеціалізованих національних словників у галузі електроенергетики шляхом перекладу виданого IEC багаточастинного електротехнічного словника IEC 60050 «International Electrotechnical Vocabulary (IEV)» [22];

2) впровадження базових пріоритетних стандартів (core standards), що формують групи стандартів, які є необхідними для функціонування більшості компонентів архітектури Smart Grid та дають змогу реалізувати каркас задля побудови сучасних інтелектуальних мереж, в яких передбачено можливість їхнього удосконалення до майбутніх потреб енергетичного ринку;

3) впровадження груп стандартів для нормативного забезпечення роботи наступних функціональних систем SmartGrid, які є найбільш актуальними для розвитку електроенергетичної системи України та є основою керування електроенергетичними системами та ринками електричної енергії в Україні (класифікація систем відповідає наведеній у технічному звіті IEC TR 63097:2017):

- система управління генерацією (Generation Management System),
- гнучкі системи передачі змінного струму (FACTS for grids),
- система енергетичного менеджменту (Energy Management system),
- система запобігання системним аваріям в енергосистемі (Black out Prevention System),
- вдосконалена система управління розподілом (Advanced Distribution Management System),
- система автоматизації розподілу (Distribution Automation System),
- система автоматизації роботи підстанцій (Substation Automation System),
- система управління розосередженими енергетичними ресурсами (Distributed Energy Resources Operation System),
- удосконалена інфраструктура обліку енергії (Advanced Metering Infrastructure),
- система управління ринками (Market places system),
- реагування на попит / управління навантаженням (Demand Response/Load Management),
- система зберігання електричної енергії (Electrical Energy Storage System);

(Впровадження стандартів із зазначених напрямків має враховувати нові міжнародні стандарти відповідної сфери застосування, що з'явилися після 2017 р. і через це не були включені до IEC TR 63097:2017).

4) досягнення послідовного та однорідного опису загальних вимог для різних областей, які складають середовище «розумних мереж», за рахунок прийняття розроблених та

впроваджених серій стандартів IEC SRD 62913, присвячених питанням комплексного формування загальних вимог до інтелектуальних мереж;

5) вжиття заходів щодо розвитку системи стандартизації в галузі електроенергетики та Smart Grid за рахунок забезпечення участі технічних комітетів стандартизації в роботі технічних комітетів стандартизації IEC та CENELEC;

6) розроблення і затвердження плану заходів щодо впровадження сучасних європейських та міжнародних стандартів у сфері розвитку “розумних мереж” для розвитку електроенергетичної системи України.

**Висновки.** За результатами аналізу стану справ щодо впровадження в Україні міжнародних та європейських стандартів у галузі Smart Grid обґрунтовано необхідність створення Стратегії із впровадження таких стандартів. Сформульовану мету Стратегії та визначено її основні задачі. Визначено основні напрямки реалізації Стратегії, серед яких першочерговим є впровадження груп стандартів для нормативного забезпечення роботи функціональних систем Smart Grid, що є основою керування електроенергетичними системами та ринками електричної енергії. Реалізація такої Стратегії дасть можливість створити в Україні національну нормативну базу, яка міститиме повний перелік національних стандартів, необхідних для забезпечення надійного та ефективного функціонування та розвитку систем передачі та розподілу України на основі концепції SmartGrid.

*Роботу виконано за держбюджетною темою: «Підвищення надійності електропостачання споживачів та розроблення засобів ідентифікації аварійних станів в розподільчих мережах ОЕС України (шифр «Індикатор»), державний реєстраційний номер теми 0122U002116, КПКВК6541230».*

1. Денисюк С.П. Енергетичний перехід – вимоги до якісних змін у розвитку енергетики. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2019. № 1. С. 7–28.
2. Vasiljevsk J., Efthimiadis T. Selection of smart grids projects of common interest – Past experiences and future perspectives. *Energies*. 2022, Vol. 15. Pp. 11–19. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15051915>
3. Clean energy for all Europeans. Communication from the commission to the European parliament, The Council, The European economic and social committee, The Committee of the regions and the European investment bank. Brussels, 30.11.2016 COM (2016).
4. Кириленко О.В., Блінов І.В., Танкевич С.Є. Smart Grid та організація інформаційного обміну в електроенергетичних системах. *Технічна електродинаміка*. 2012. № 3. С. 47–48. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.05.059>.
5. Блінов І.В. Проблеми функціонування та розвитку ринку електричної енергії України (за матеріалами наукової доповіді на засіданні Президії НАН України 3 лютого 2021 р.). *Вісник НАН України*. 2021. № 3. С. 20–28. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2019.54.005>.
6. Fan Z., Kulkarni P., Gormus S., Efthymiou C., Kalogridis G., Sooriyabandara M., Zhu Z., Lambbotharan S., Hau Chin W. Smart Grid Communications: Overview of Research Challenges, Solutions, and Standardization Activities. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2013. Vol. 15. No 1. Pp. 21–38. DOI: <https://doi.org/10.1109/SURV.2011.122211.00021>.
7. Про схвалення Концепції впровадження “розумних мереж” в Україні до 2035 року. Розпорядження КМУ № 908-р від 14 жовтня 2022 р.
8. Кириленко О.В., Павловський В.В., Блінов І.В. Науково-технічне забезпечення організації роботи ОЕС України в синхронному режимі з континентальною європейською енергетичною системою ENTSO-E. *Технічна електродинаміка*. 2022. № 5. С. 59–66. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.05.059>.
9. Блінов І.В., Парус Є.В. Врахування мережевих обмежень та мінімізація різниці цін між ринками електроенергії. *Технічна електродинаміка*. 2015. № 4. С. 81–88.
10. Танкевич С.Є., Блінов І.В., Кириленко В.В. Україна та світ: нормативне забезпечення інтелектуальних електроенергетичних систем за концепцією Smart Grid. *Стандартизація, сертифікація, якість*. 2014. № 4 (89). С. 38–44.
11. IEC/TR 63097:2017 Smart grid standardization roadmap. 2017. 315 p.
12. Blinov I., Tankevych S. The harmonized role model of electricity market in Ukraine. In: 2016 2nd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems, IEPS 2016 Conference Proceedings (2016).
13. Блінов І.В., Парус Є.В., Шкарупило В.В. Структура та моделі інформаційної взаємодії учасників ринку електричної енергії. Вінниця: ГО «Європейська наукова платформа», 2021, 114 с. DOI: <https://doi.org/10.36074/stmivvyree-monograph.2021>.
14. Charalampidou N., Heidelberg L. L. M. Smart grids and sustainable energy future in the international and European legal order. 2018 6th International Istanbul Smart Grids and Cities Congress and Fair (ICSG), 2018, Pp. 25–29. DOI: <https://doi.org/10.1109/SGCF.2018.8408935>.

15. SGC/M490/G\_Smart Grid Set of Standards 25 Version 3.1. CEN-CENELEC-ETSI Smart Grid Coordination Group. 2014. P. 259.
16. Kotsakis E., Fulli G., Masera M. Smart Grid Interoperability lab at the joint research centre (JRC) of the European Commission: Towards a European platform for real time simulation. *2016 AEIT International Annual Conference (AEIT)*. 2016. Pp. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.23919/AEIT.2016.7892769>.
17. Moursheda M., Robertb S., Ranallic A., Messerveyd T., Reforgiatod D., Contreaue R., Becuef A., Quinng K., Rezguia Y., Lennardd Z. Smart grid futures: Perspectives on the integration of energy and ICT services. *The 7th International Conference on Applied Energy – ICAE2015. Energy Procedia*. Vol. 75, 2015. Pp. 1132–1137.
18. IEC SRD 62913 Generic smart grid requirements. Parts 1 and 2. URL: <https://webstore.iec.ch/>
19. Baranov G., Komisarenko O., Zaitsev I.O., Chernytska I. SMART technologies for transport tests networks, exploitation and repair tools. In Proc. of the International Conference Artificial Intelligence and Smart Systems (ICAIS). 25-27, March 2021, Pichanur (India), 2021. Pp. 621–625. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICAIS50930.2021.9396055>.
20. IEC 62351 Cyber Security Series for the Smart Grid. URL: <https://syc-se.iec.ch/deliveries/cybersecurity-guidelines/security-standards-and-best-practices/iec-62351/>
21. The conceptual model and its relation to market models for Smart Grids. SG-CG/M490/J\_ General Market Model Development. CEN-CENELEC-ETSI Smart Grid Coordination Group. 2014. P. 25.
22. IEC 60050 Electropedia: The World's Online Electrotechnical Vocabulary. URL: <https://www.electropedia.org/>

## INTERNATIONAL AND EUROPEAN STANDARDS IMPLEMENTATION FOR USES OF SMART GRID CONCEPT IN IPS OF UKRAINE

O. Kyrylenko<sup>1</sup>, I. Blinov<sup>1</sup>, Ie. Zaitsev<sup>1</sup>, S. Palachov<sup>1</sup>, V. Vasylychenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup> – Institute of Electrodynamics of the National Academy of Science of Ukraine, pr. Peremohy, 56, Kyiv-57, 03057, Ukraine

<sup>2</sup> – NPC Ukrenergo, st. Simona Petlyury, 25, Kyiv, 01032, Ukraine  
e-mail: [blinovigor81@gmail.com](mailto:blinovigor81@gmail.com)

*This paper presents prerequisites and goals for the development of the regulatory framework of Ukraine are considered. This allows you to provide the development of electrical networks following the concept of Smart Grid and introducing "smart grids" in Ukraine until 2035. The expediency of developing a national strategy for implementing international and European standards for developing the IPS of Ukraine is substantiated. The goals and main tasks of the strategy are defined. The goals are to apply a systematic approach to defining, implementing, and updating priority international and European standards. Achieving the goals will ensure sustainable and synchronized development of the UES of Ukraine following the Smart Grid concept. The main direct implementation of the strategy for promoting international and European standards for developing the IPS of Ukraine was reviewed based on the concept of a Smart Grid. Ref. 22.*

**Keywords:** electric power system, Smart Grid, International Electrotechnical Commission, standardization.

1. Denysiuk S.P. Energy transition – requirements for qualitative changes in energy development. *Energy: economy, technologies, ecology*. 2019. No 1. Pp. 7–28. DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.1.2019.182171>
2. Vasiljevska J., Efthimiadis T. Selection of smart grids projects of common interest – Past experiences and future perspectives. *Energies*. 2022, Vol. 15. Pp. 11–19. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15051915>
3. Clean energy for all Europeans. Communication from the commission to the European parliament, The Council, The European economic and social committee, The Committee of the regions and the European investment bank. Brussels, 30.11.2016 COM (2016).
4. Kyrylenko O.V., Blinov I.V., Tankevich S.E. Smart Grid and the organization of information exchange in electric power systems. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2012. No 3. P. 47–48. DOI: <https://doi.org/10.15407/techmed2022.05.059>
5. Blinov I.V. Problems of functioning and development of the electric energy market of Ukraine. (based on the materials of the scientific report at the meeting of the Presidium of the National Academy of Sciences of Ukraine on February 3, 2021). *Visnyk NAN Ukrainy*. 2021. No 3. P. 20–28. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2019.54.005>
6. Fan Z., Kulkarni P., Gormus S., Efthymiou C., Kalogridis G., Sooriyabandara M., Zhu Z., Lambbotharan S., Hau Chin W. Smart Grid Communications: Overview of Research Challenges, Solutions, and Standardization Activities. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2013. Vol. 15. No 1. Pp. 21–38. DOI: <https://doi.org/10.1109/SURV.2011.122211.00021>
7. On the approval of the Concept of implementation of "smart networks" in Ukraine until 2035. Decree of the CMU No. 908 of October 14, 2022.
8. 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/techmed2022.05.059>

9. Blinov I., Parus Y. Congestion management and minimization of price difference between coupled electricity markets. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2015. No 4. Pp. 81–88.
10. Tankevich S.E., Blinov I.V., Kyrylenko V.V. Ukraine and the world: regulatory support for intelligent electric power systems based on the Smart Grid concept. *Standartyzatsiia, sertyfikatsiia, yakist.* 2014. No 4 (89). P. 38–44.
11. IEC/TR 63097:2017 Smart grid standardization roadmap. 2017. 315 p.
12. Blinov I., Tankevych S. The harmonized role model of electricity market in Ukraine. In: 2016 2nd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems, IEPS 2016 Conference Proceedings (2016). DOI: <https://doi.org/10.1109/IEPS.2016.7521861>
13. Blinov I.V., Parus E.V., Shkarupilo V.V. The structure of that model of informational interaction between participants in the electricity market. Vinnitsa: NGO "European Science Platform", 2021, 114 p. DOI: <https://doi.org/10.36074/stmivvyree-monograph.2021>
14. Charalampidou N., Heidelberg L. L. M. Smart grids and sustainable energy future in the international and European legal order. *2018 6th International Istanbul Smart Grids and Cities Congress and Fair (ICSG)*, 2018, Pp. 25–29. DOI: <https://doi.org/10.1109/SGCF.2018.8408935>
15. SGCG/M490/G\_Smart Grid Set of Standards 25 Version 3.1. CEN-CENELEC-ETSI Smart Grid Coordination Group. 2014. P. 259.
16. Kotsakis E., Fulli G., Masera M. Smart Grid Interoperability lab at the joint research centre (JRC) of the European Commission: Towards a European platform for real time simulation. *2016 AEIT International Annual Conference (AEIT)*. 2016. Pp. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.23919/AEIT.2016.7892769>
17. Moursheda M., Robertb S., Ranallic A., Messerveyd T., Reforgiatod D., Contreaue R., Becuef A., Quinng K., Rezguia Y., Lennardd Z. Smart grid futures: Perspectives on the integration of energy and ICT services. *The 7th International Conference on Applied Energy – ICAE2015. Energy Procedia*. Vol. 75, 2015. Pp. 1132–1137. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.531>
18. IEC SRD 62913 Generic smart grid requirements. Parts 1 and 2. URL: <https://webstore.iec.ch/>
19. Baranov G., Komisarenko O., Zaitsev I.O., Chernytska I. SMART technologies for transport tests networks, exploitation and repair tools. In Proc. of the International Conference Artificial Intelligence and Smart Systems (ICAIS). 25-27, March 2021, Pichanur (India), 2021. Pp. 621–625. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICAIS50930.2021.9396055>
20. IEC 62351 Cyber Security Series for the Smart Grid. URL: <https://syc-se.iec.ch/deliveries/cybersecurity-guidelines/security-standards-and-best-practices/iec-62351/>
21. The conceptual model and its relation to market models for Smart Grids. SG-CG/M490/J\_ General Market Model Development. CEN-CENELEC-ETSI Smart Grid Coordination Group. 2014. P. 25.
22. IEC 60050 Electropedia: The World's Online Electrotechnical Vocabulary. URL: <https://www.electropedia.org/>

Надійшла: 02.11.2022

Прийнята: 11.11.2022

Submitted: 02.11.2022

Accepted: 11.11.2022

УДК 621.3

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2022.63.013>

## ЗАГАЛЬНІ ВИМОГИ ДО ПОБУДОВИ ТА ВИКОРИСТАННЯ ГІБРИДНИХ МІКРОСИСТЕМ В РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖАХ

**А.Ф. Жаркін<sup>1\*</sup>**, акад. НАН України, докт. техн. наук, **С.О. Палачов<sup>1\*\*</sup>**, канд. техн. наук, **В.А. Попов<sup>2\*\*\*</sup>**, докт. техн. наук, **В.В. Ткаченко<sup>2\*\*\*\*</sup>**, канд. техн. наук, **І.В. Фролов<sup>2\*\*\*\*\*</sup>**

<sup>1</sup> – Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна

<sup>2</sup> – НТУ України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,  
пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна  
e-mail: [tig@ukr.net](mailto:tig@ukr.net)

*У статті обґрунтовується доцільність формування гібридних мікросистем, які можуть бути інтегровані в централізовану систему електропостачання або працювати автономно з метою розширення використання відновлюваних джерел енергії та запобігання їхнього можливого негативного впливу на режими електричних мереж. Запропоновано дворівневий підхід до керування роботою гібридної мікросистеми, який передбачає етап попереднього планування на підставі прогнозних даних щодо навантажень, вихідної потужності відновлюваних джерел генерації, ринкової ціни на електричну енергію та етап оперативного керування на підставі даних, що отримуються в реальному часі. Пропонується низка цільових функцій та обмежень для вирішення завдання планування оптимального режиму роботи гібридної мікросистеми в багатокритеріальній постановці. Одночасно з цим обґрунтовується можливість трансформації цієї задачі до однокритеріальної. Здійснено аналіз переваг та недоліків кожного із запропонованих підходів. Бібл. 12.*

**Ключові слова:** розосереджена генерація, розподільні мережі, мікросистеми, накопичувачі енергії, багатокритеріальна оптимізація.

**Вступ.** Постійно зростаюче використання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) безперечно є стратегічним напрямком розвитку сучасної світової енергетики. Впровадження ВДЕ відбувається як на рівні системоутворюючих мереж, так і у формі розосередженої генерації (РГ) на рівні систем розподілу електричної енергії.

У той же час насичення розподільних мереж відновлюваною генерацією, тим паче одного типу, призводить до виникнення низки проблем, пов'язаних передусім із непостійністю та непередбачуваністю рівня генерації з боку зазначених джерел [1]. Інтеграція в електричні мережі ВДЕ зі змінною вихідною потужністю фактично перетворює традиційну генерацію електроенергії з керованих та диспетчеризованих ресурсів на некеровані та недиспетчеризовані.

Дослідження та вже накопичений певний досвід останніх років свідчать, що ефективним кроком, спрямованим на полегшення впровадження зростаючих обсягів відновлюваної генерації та усунення пов'язаних з цим можливих негативних наслідків для електромереж, є побудова та використання мікромереж (microgrids), а точніше мікросистем, насамперед гібридних.

В останньому випадку йдеться про об'єднання та скоординоване використання при нагоді різнорідних поновлюваних (недиспетчеризованих) та диспетчеризованих джерел енергії, систем накопичення енергії (у загальному випадку також гібридних) та керованих навантажень (включаючи станції заряджання електромобілів) у мережі низької напруги, які можуть бути інтегровані в централізовану систему електропостачання як із застосуванням засобів силової електроніки, так і безпосередньо, або працювати в автономному режимі.

У будь-якому випадку для ефективного використання гібридної мікросистеми необхідно створення стратегії управління, що забезпечує гармонійну взаємодію між усіма її контрольованими компонентами для досягнення стабільної та економічної роботи.



З цією метою нижче запропоновано дворівневий підхід до прийняття рішень у процесі реалізації управління роботою мікросистеми, що включає рівень планування й рівень диспетчеризації (оперативного управління).

На рівні планування визначається економічно обґрунтована та технічно припустима схема (алгоритм) роботи мікросистеми, що, власне кажучи, полягає в знаходженні стану та параметрів усіх елементів керованого блоку мікросистеми на основі прогнозування на добу наперед значень навантажень та вихідних потужностей відновлюваних джерел енергії шляхом використання відповідних оптимізаційних методів.

Водночас, враховуючи неминучість наявності похибки, що виникає в процесі прогнозування, на цьому етапі, власне, формується лише орієнтовний оптимальний сценарій роботи керованих елементів мікросистеми на наступну добу.

На рівні диспетчеризації здійснюється оперативне управління роботою мікросистеми, пов'язане з коригуванням керуючих впливів на окремі її компоненти в зв'язку з різницями між прогнозними й фактичними (одержуваними в реальному часі) значеннями параметрів режиму.

**Планування оптимального режиму роботи гібридної мікросистеми.** Важливим етапом запропонованого методу управління роботою мікросистеми є формування цільової функції (або низки цільових функцій), а також відповідної системи обмежень. Складність реалізації цього етапу полягає в тому, що оптимальне використання мікросистеми передбачає необхідність досягнення кількох, часто не сумісних цілей, зокрема пов'язаних з економічними результатами, бажанням максимально використовувати потенціал ВДЕ, забезпечити нормовані значення широкого спектру показників якості електричної енергії й стійкість роботи мікросистеми, вимогою до мінімізації негативного впливу на навколишнє середовище та ряд інших.

Водночас логічно припустити, що цілі, що формуються, і тим більше присутні в оптимізаційній задачі обмеження, будуть значною мірою залежати від того, чи передбачається робота мікросистеми в умовах її підключення до централізованої системи електропостачання в автономному режимі або автономний режим є вимушеним і має місце тільки за умов аварійного відключення від енергосистеми з метою підвищення надійності електропостачання споживачів.

В умовах паралельної роботи з енергосистемою для задоволення попиту на електроенергію, що змінюється, формально може бути використаний весь спектр обладнання керованого блоку мікросистеми (диспетчеризовані джерела розосередженої генерації, потенціал управління навантаженням, системи накопичення енергії, електроенергія, що отримується з енергосистеми або в неї поставляється). За такої умови найбільший інтерес становить завдання максимізації за заданий період часу доходів мікросистеми відповідно до можливості: вироблення електроенергії недиспетчеризованими джерелами РГ, регулювання обсягів обміну енергією з централізованою системою електропостачання, використання потенціалу регульованих навантажень та ресурсів систем накопичення енергії (СНЕ), з одночасним урахуванням ринкової ціни на електроенергію.

Одночасно з цим враховуються вимоги до режиму напруги та забезпечення інших показників якості електричної енергії, оптимізації потокорозподілу з метою мінімізації втрат енергії (загалом як у самій мікросистемі, так і в пов'язаних з нею електричних мережах).

Таким чином, розв'язання задачі передбачає формування кількох цільових функцій або окремих складових (за відповідного їхнього формування та прийняття низки припущень) певної глобальної цільової функції.

Теоретично в процесі створення гібридних мікросистем може бути задіяний досить широкий спектр джерел, що недиспетчеризуються. Однак, виходячи з практичних міркувань, тут найчастіше розглядаються фотоелектричні станції та вітрогенератори, які сьогодні знайшли найбільш широке застосування. Аналогічна ситуація складається і з джерелами енергії, що диспетчеризуються. У цьому випадку поряд з такими широко поширеними джерелами, як дизельні генератори або мікротурбіни, потенційно можуть розглядатися і більш сучасні технології, наприклад, паливні комірки.

Питання обґрунтування вибору технічних засобів акумулювання енергії потребує окремого розгляду. Річ у тому, що, по-перше, спектр зазначених засобів сьогодні досить широкий, і всі вони мають суттєво різні техніко-економічні характеристики. По-друге, що ще важливіше, зазначені пристрої можна досить однозначно диференціювати залежно від їхнього цільового призначення: згладжування графіків навантаження; регулювання частоти та режиму напруг; демпфування коливань потужності в мережі, викликаних нерівномірністю генерації з боку відновлюваних джерел енергії; підвищення надійності електропостачання (особливо в разі ізолюваної роботи мікросистеми) тощо [2–4].

Завдання управління навантаженням не є таким актуальним, якщо мікросистема пов'язана з централізованою енергосистемою та має можливість отримання за необхідності відповідної підтримки з її боку. На противагу цьому, у разі ізолюваної роботи мікросистеми завдання управління навантаженням набуває принципового значення. Це пов'язано з тим, що без наявності такої можливості в багатьох випадках дуже складно забезпечити надійну й стійку роботу ізолюваної мікросистеми щодо дотримання балансу між генерацією та споживанням навіть за наявності в структурі джерел, що диспетчеризуються, або/та систем накопичення енергії.

У загальному випадку завдання оптимального управління роботою гібридної мікросистеми має кілька цілей.

1. Якщо мікросистема та споживачі не мають спільних економічних інтересів, то однією з цілей можна розглядати максимізацію прибутку мікросистеми від реалізації електричної енергії споживачам:

$$f_1(A_L) = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_L} C_{Li} \times P_{Lit} \rightarrow \max, \quad (1)$$

де  $C_{Li}$  – тариф на електричну енергію,  $P_{Lit}$  – навантаження  $i$ -го споживача на момент часу  $t$ ,  $N_L$  – кількість споживачів.

2. Мінімізація імпорту електричної енергії з централізованої системи електропостачання:

$$f_2(A_{GR}) = \sum_{t=1}^T P_{GRt}. \quad (2)$$

Як альтернатива може розглядатися мінімізація витрат на електроенергію, що отримується з енергосистеми, але з огляду на те, що мікросистема може здійснювати двосторонній обмін енергією з енергосистемою, то в даному випадку правильніше було б говорити про максимізацію доходу, що отримується від купівлі та продажу електроенергії в енергосистему. У цьому випадку отримуємо:

$$f_2(A_{GR}) = \sum_{t=1}^T (C_{GRt}^+ \times P_{GRt}^+ - C_{GRt}^- \times P_{GRt}^-), \quad (3)$$

де  $C_{GRt}^+$ ,  $C_{GRt}^-$  – тарифи відповідно на продаж та купівлю електричної енергії;  $P_{GRt}^+$ ,  $P_{GRt}^-$  – відповідно потужність, що надходить в енергосистему і яка одержується мікросистемою з енергосистеми в момент часу  $t$ .

3. Мінімізація енергії, що виробляється традиційними джерелами генерації, орієнтованими на використання органічного палива, які виступають у ролі джерел розосередженої генерації, що диспетчеризуються:

$$f_3(A_{DG}) = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^{n_{DG}} P_{DGjt}, \quad (4)$$

де  $P_{DGjt}$  – потужність  $j$ -го джерела розосередженої генерації, що диспетчеризуються, в момент часу  $t$ ,  $n_{DG}$  – кількість відповідних джерел генерації.

Альтернативою тут як мета може розглядатися мінімізація витрат на генерацію електричної енергії, що виробляється джерелами розосередженої генерації, що диспетчеризуються та працюють на органічному паливі:

$$f_3(A_{DG}) = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^{n_{DG}} C_j \times P_{DGjt}, \quad (5)$$

де  $C_j$  – питома (грн./кВт) вартість палива для  $j$ -го джерела генерації.

Тут слід зазначити, що питома вартість палива не є постійною величиною, що диференціюється лише відповідно до окремих видів генераторів. У багатьох випадках цей показник залежить від потужності, що генерується в конкретний момент часу і до того ж ця залежність є нелінійною, зокрема, представляється у вигляді [5]:

$$C_{jt} = a_0 + a_1 \times P_{jt} + a_2 \times P_{jt}^2.$$

Однак, у більшості досліджень автори з метою можливості застосування оптимізаційних методів на основі лінійного програмування обґрунтовують та використовують лінеаризацію цієї залежності (наприклад, в [6]), що є суттєвим припущенням.

Крім того, для низки установок, що генерують (зокрема, дизельних генераторів), у багатьох роботах пропонується враховувати додаткові витрати, пов'язані з їхнім пуском (start-up cost).

4. Мінімізація викидів у довкілля з боку джерел генерації, які працюють на органічному паливі. У цьому випадку до подібних джерел відноситься розосереджена диспетчеризована генерація. Тут можна розглядати як окремі складові викидів, наприклад,  $SO_2$ ,  $CO_2$ ,  $NO_x$ , так і обсяг сукупних ( $n_g$ ) викидів:

$$f_4(G) = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{n_{DG}} \sum_{j=1}^{n_g} g_{ij} \times P_{it}, \quad (6)$$

або плату за зазначені викиди:

$$f_4(G) = \sum_{t=1}^T C_g \sum_{i=1}^{n_{DG}} \sum_{j=1}^{n_g} g_{ij} \times P_{it}, \quad (7)$$

де  $g_{ij}$  – питомі викиди  $j$ -го типу із боку  $i$ -го джерела,  $C_g$  – плата (питома) за викиди парникових газів.

5. Мінімізація обсягу регульованого навантаження або стимулюючої плати споживачам за їхню участь у програмі регулювання навантаження:

$$f_5(P_{LR}) = \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K P_{LRkt}, \quad (8)$$

або

$$f_5(P_{LR}) = \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K P_{LRkt} \times C_{kt}, \quad (9)$$

де  $K$  – кількість споживачів, що приймають участь у програмі регулювання навантаження,  $C_{kt}$  – стимулююча плата  $k$ -му споживачу за участь у програмі регулювання навантаження,  $P_{LRkt}$  – обсяг регулювання навантаження  $k$ -м споживачем у момент часу  $t$ .

6. Мінімізація втрат електричної енергії в усіх елементах мікросистеми або мінімізація вартості вказаних втрат:

$$f_6(\Delta A) = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^M \Delta P_{jt}, \quad (10)$$

або

$$f_6(\Delta A) = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^M \Delta P_{jt} \times C_{et}, \quad (11)$$

де  $\Delta P_{jt}$  – втрати потужності в  $j$ -ому елементі мікросистеми в  $t$ -й момент часу,  $M$  – кількість елементів мікросистеми, що визначається її структурою,  $C_{et}$  – вартість (питома) втрат потужності.

Цілі, що пов'язані з оптимізацією використання СНЕ, насамперед акумуляторних батарей, мають певні особливості. Річ у тому, що порівняно з усіма технічними засобами, які можуть бути присутніми в структурі гібридної мікросистеми, саме пристрої акумуляування мають найменший життєвий цикл. Так, якщо для більшості обладнання, що генерує, орієнтованого як на органічне паливо, так і на відновлювану енергію вітру або сонця, життєвий цикл становить близько 20 років, то для більшості типів акумуляторних батарей сьогодні він не перевищує 5–6 років. До того ж цей термін істотно залежить від режиму роботи акумуляторів, зокрема кількості та глибини циклів заряд/розряд.

З огляду на це в деяких випадках зазначені обставини ускладнюють формування цільової функції, що оптимізує використання СНЕ. Тут може йтися про мінімізацію витрат, пов'язаних із використанням системи накопичення, що впливає з необхідності задоволення низки обмежень. Ці обмеження зі свого боку залежить від набору конкретних завдань (додатків), які будуть поставлені перед СНЕ. Очевидно, що, якщо йдеться лише про балансування навантаження, то СНЕ можуть розглядатися як певна альтернатива процедурі регулювання навантаження споживачів та/або обміну електроенергією з енергосистемою (за наявності такої можливості).

У тому випадку, якщо СНЕ розглядається як засіб демпфування коливань потужності, що пов'язане з використанням відновлюваних джерел енергії, то така система, власне, є безальтернативним рішенням за умови, що мікросистема працює в автономному режимі.

Аналіз існуючих досліджень у цьому напрямку дає змогу зробити такий висновок. Неможливо в аналітичному вигляді визначити загальну техніко-економічну оцінку використання СНЕ. Має сенс її формувати індивідуально в кожному конкретному випадку застосування СНЕ залежно від функцій, які на неї покладаються. Так, наприклад, у разі, коли мікросистема працює разом з енергосистемою, останню доцільно використовувати, передусім, з метою демпфування коливань потужності, викликаних специфікою генерації з боку поновлюваних джерел енергії. На СНЕ в такому разі покладаються функції участі в балансуванні режимів, вирівнюванні графіків навантаження з метою недопущення перевантаження окремих елементів мікросистеми, зниження втрат потужності, забезпечення допустимих значень відхилень напруги та інших показників якості електричної енергії.

Відносно незалежним залишається питання участі СНЕ в підвищенні надійності електропостачання, оскільки це вимагає врахування додаткових факторів для визначення її оптимальних параметрів.

Суттєво складніше вирішується це питання, коли йдеться про цілком автономну роботу мікросистеми або продовження її роботи після від'єднання від системи централізованого електропостачання. Ґрунтуючись на існуючому аналізі функціональних можливостей та ефективності використання різних засобів накопичення енергії, можна зробити висновок, що в такому разі, принаймні теоретично, було б доцільним орієнтуватися на гібридні СНЕ, де кожна з технологічних одиниць, що входять до їхнього складу, орієнтована на виконання певних функцій. Важливою властивістю СНЕ з інверторним інтерфейсом є можливість їхнього використання як джерела віртуальної інерції для підвищення стабільності частоти завдяки компенсації низької інерції ВДЕ. Наприклад, пристрої накопичення кінетичної енергії доцільні для демпфування коливань потужності, а відповідно й коливань частоти та напруги в мікросистемі з метою підтримки стійкості її роботи. Проточні редокс-ванадієві акумулятори підходять для керування режимом електроспоживання в добовому розрізі. У разі орієнтації на літій-іонні акумулятори необхідно враховувати, що для них економічно обґрунтованим є використання не більше 3 – 4 циклів заряду/розряду протягом доби.

У разі вирішення питання планування оптимального управління роботою гібридної мікросистеми можливо застосування двох стратегій. У першому випадку зазначене завдання розглядається як проблема багатокритеріальної оптимізації, де як окремі цільові функції виступають вирази (1), (2), (4), (6), (8), (10). У другому випадку формується єдина адитивна цільова функція, де окремі її компоненти визначаються згідно з виразами (1), (3), (5), (7), (9), (11). Зрозуміло, що кожна із зазначених стратегій має свої певні переваги та недоліки.

Добре відомі проблеми, пов'язані з вирішенням багатокритеріальних оптимізаційних задач, визначенням єдиного умовно оптимального рішення, що значною мірою залежить від попередньо прийнятих достатньо суб'єктивних гіпотез та припущень.

У той же час адекватність єдиної загальної цільової функції буде суттєво залежати від обґрунтованості та точності визначення низки таких прогностичних вартісних характеристик: питома вартість енергії, що продається та купується з енергосистеми, питома вартість палива, яке використовується джерелами генерації, що диспетчеризуються (визначення якої, як зазначалося вище, додатково потребує прийняття суттєвих спрощень та припущень) та ряду інших вартісних показників.

У будь-якому випадку, під час постановки та реалізації завдань, пов'язаних із оптимізацією структури та режимів роботи мікросистем, важливим етапом є формування функціональних обмежень. Основними під час вирішення зазначених завдань є такі обмеження.

1. Дотримання умов забезпечення балансу між генерацією та навантаженням з урахуванням втрат потужності в елементах мікросистеми:

$$P_{GRt}^+ + \sum_{i=1}^{n_{DG}} P_{DGit} + P_{dcht} + \sum_{i=1}^{n_{PV}} P_{PVit} + \sum_{i=1}^{n_W} P_{Wit} = \sum_{j=1}^{n_L} P_{Ljt} + \sum_{j=1}^m \Delta P_{jt} + P_{GRt}^- + P_{cht} - \sum_{k=1}^K P_{Lrk},$$

де  $P_{GRt}^+$ ,  $P_{GRt}^-$  – потужність, відповідно одержувана з енергосистеми, і та, що віддається в енергосистему,  $P_{cht}$ ,  $P_{dcht}$  – потужність, відповідно одержувана системою накопичення енергії, і та, що віддається нею в мікросистему,  $P_{DGit}$  – потужність, що генерується  $i$ -им джерелом розосередженої генерації, що диспетчеризується,  $P_{Wit}$  – потужність, що генерується  $i$ -им вітрогенератором,  $P_{PVit}$  – потужність, що генерується  $i$ -ою фотовольтаїчною станцією,  $P_{Ljt}$  – навантаження  $j$ -го споживача,  $\Delta P_{jt}$  – втрати потужності в  $j$ -му елементі мікросистеми,  $P_{Lrk}$  – величина регульованого навантаження  $k$ -м споживачем,  $n_{PV}$ ,  $n_W$ ,  $n_L$ ,  $m$ ,  $K$  – кількість відповідно фотовольтаїчних установок, вітрогенераторів, споживачів, елементів мікросистеми, споживачів-регуляторів.

2. Максимальна, а іноді й мінімальна допустима вихідна потужність джерел розосередженої генерації, що диспетчеризуються:  $P_{DGt}^{\min} \leq P_{DGt} \leq P_{DGt}^{\max}$ ,  $i = 1, \dots$ .

3. Обсяг регульованого навантаження:  $0 \leq P_{Lrk} \leq P_{Lrk}^{\max}$ ,  $k = 1, \dots, K$ .

Власне кажучи, усі навантаження можуть бути розділені на ряд категорій, зокрема: критичні; ті, що переносяться на інші періоди часу; ті, що відключаються. Відповідно й наведені обмеження в загальному випадку можуть задаватися незалежно для кожної з перерахованих категорій.

4. Обмеження для системи накопичення енергії [7]:

– за потужністю заряду та розряду

$P_{cht} < P_{Er}$ ,  $P_{dcht} < P_{Er}$ , де  $P_{Er}$  – номінальна потужність батареї;

– за допустимою ємністю

$$A_{Et} = A_{E(t-1)} - \left[ \frac{P_{dcht}}{\eta_{dch}} \times \Delta t_{dch} - P_{cht} \times \eta_{ch} \right];$$

– за допустимою потужністю заряду/розряду

$$P_{E \min t} \leq P_{Et} \leq P_{E \max t},$$

де  $P_{E \min t}$ ,  $P_{E \max t}$  – максимальне та мінімальне значення обмінної потужності в момент часу  $t$ .

Очевидно, що питання прогнозування на етапі планування займають особливе місце в реалізації цього підходу до управління роботою гібридної мікросистеми. У загальному випадку йдеться про прогнозування кількох груп параметрів: навантажень споживачів, вихідної потужності відновлюваних джерел енергії, ринкової вартості електроенергії та надання інших допоміжних послуг. Крім того, що для прогнозування кожної групи

параметрів найбільш ефективними, швидше за все, є різні методи, всі вони мають певну похибку, яка до того ж не є постійною протягом доби.

Запропоновано кілька різних підходів, пов'язаних із методологією та технікою обліку похибок прогнозування [7]. У роботі [8] розглядається досить поширений, так званий сценарний підхід до врахування похибок прогнозування. У такому разі для навантаження й вихідної потужності кожного з відновлюваних джерел енергії в цій роботі визначалася низка сценаріїв (дискретних значень можливих похибок прогнозування із зазначенням імовірності появи кожної з них), на підставі чого обчислювалась імовірність реалізації кожного зі сценаріїв. Після цього для кожного зі сценаріїв вирішувалося завдання оптимального керування роботою мікросистеми. Очевидно, що в цьому випадку потрібно розглядати досить велику кількість сценаріїв з оцінкою ймовірностей їхньої появи для переконливого обліку невизначеності інформації. Хоча подібні формулювання здаються досить переконливими для врахування невизначеності, але обґрунтування, наприклад, функцій розподілу ймовірностей та відповідних параметрів для моделювання невизначеності ускладнене і часто має суб'єктивний характер.

Слід зазначити, що аналогічні за своєю ідеологією пропозиції щодо стратегії управління роботою мікросистемами розглядалися й у інших дослідженнях. Наприклад, у [9] запропоновано систему енергоменеджменту, засновану на стратегії ковзного горизонту для ізольованої мікросистеми, що складається з фотоелектричних панелей, двох вітряних турбін, дизельного генератора та системи накопичення енергії. Системою управління враховується прогноз потужності, що генерується з боку відновлюваних джерел і величини навантаження на два дні наперед. Оптимізаційна задача вирішується з використанням змішаного цілочисельного лінійного програмування, що забезпечує отримання квазіоптимального рішення. У [10] пропонується дворівневий скоординований підхід до управління мікросистемою як у режимі підключення до мережі, так і за умов автономної роботи. На першому рівні на основі прогнозних даних вирішується завдання максимізації доходів відповідно до заявок з боку джерел РГ та з урахуванням ринкової ціни на електроенергію, а на другому рівні забезпечується потужність керованих одиниць обладнання, що генерує на основі даних, що отримуються в реальному часі.

Для вирішення завдання оптимального управління мікросистемою пропонувалися різні методи оптимізації, досить детальний огляд яких наведено в [11].

Використовувалися як класичні методи (лінійне, нелінійне, динамічне та стохастичне програмування), так і евристичні й еволюційні алгоритми. У ряді робіт також здійснювався облік невизначеності навантаження та вихідної потужності відновлюваних джерел енергії під час вирішення зазначених завдань [12]. Проте відсутні переконливі докази беззаперечних переваг будь-якого з перелічених методів.

У більшості випадків цілі оптимізації полягали в максимальному використанні відновлюваної енергії для задоволення локального попиту та оптимізації використання батареї на користь споживача завдяки зниженню вартості споживаної енергії за збереження надійності всієї системи електропостачання. У той же час у багатокритеріальній постановці зазначена задача майже не вирішувалася.

### **Висновки.**

Сутність запропонованого в статті підходу до управління гібридною мікросистемою полягає в тому, щоб об'єднати переваги схем, заснованих як на плануванні управління на певному горизонті, так і прийнятті рішень у реальному часі, що може бути обґрунтовано таким способом. Зрозуміло, що уникнути появи більших чи менших похибок у процесі прогнозування (навіть короткострокового в межах доби) вихідної потужності відновлюваних джерел енергії, навантажень споживачів, ринкової вартості електроенергії тощо практично неможливо. Відповідно з похибками будуть визначатися керуючі дії, які формуються на їхній основі. Радикальним рішенням у такому разі може бути лише реалізація управління в реальному часі. Але за таких умов виникає проблема як оперативного відпрацювання можливих досить великих збурень, так і оперативного вирішення досить складної оптимізаційної задачі, що достатньо проблематично реалізувати в реальному часі. Етап

планування дає змогу заздалегідь підготувати систему до можливих умов її функціонування, що на другому етапі диспетчеризації дозволить спростити відпрацювання дисбалансу, що виник, використовуючи у такому разі більш прості алгоритми для прийняття відповідних рішень.

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 від 09.07.201 р., протокол № 12, КПКВК 6541030.

1. Muruganantham B., Gnanadass R., Padhy N. Challenges with renewable energy sources and storage in practical distribution systems. *Renew Sustain Energy Rev.* 2017. Vol. 73. Pp. 125–134.
2. Blinov I., Trach I., Parus Y., Khomenko V., Kuchanskyy V., Shkaruplyo V. Evaluation of The Efficiency of The Use of Electricity Storage Systems in The Balancing Group and The Small Distribution System. *IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. Kharkiv, Ukraine, September 13-17, 2021. Pp. 262–265. DOI: <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek53812.2021.9569981>
3. 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: [10.15407/techned2021.04.044](https://doi.org/10.15407/techned2021.04.044)
4. Парус Є.В., Блінов І.В., Олефір Д.О. Оцінка економічного ефекту від надання системами накопичення електричної енергії послуги балансування в ОЕС України. *Праці інституту електродинаміки НАН України*. 2021. № 60. С. 28–37
5. Murty V. V. S. N., Kumar Ashwani. Multi-objective energy management in microgrids with hybrid energy sources and battery energy storage systems, *Protection and Control of Modern Power Systems*. 2020. No 5. 2.
6. Alharbi W., Raahemifar K. Probabilistic coordination of microgrid energy resources operation considering uncertainties *Electric Power Systems Research* 128, 2015. Pp. 1–10.
7. Chen S., Gooi H.B, Wang M. Sizing of energy storage for microgrids. *IEEE Trans. Smart Grid* 3. 2012. Pp. 142–151.
8. Walied Alharbi, Kaamran Raahemifar Probabilistic coordination of microgrid energy resources operation considering uncertainties *Electric Power Systems Research* 125. 2015. Pp. 1–10.
9. Palma-Behnke R., Benavides C., Lanas F., Severino B., Reyes L., Llanos J., and Sáez D.A Microgrid Energy Management System Based on the Rolling Horizon Strategy. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 4(2). June 2013. Pp. 996–1006.
10. Jiang Q., Xue M. and Geng G.. Energy management of microgrid in grid-connected and stand-alone modes. *IEEE Transactions on Power Systems*, 28(3): Aug. 2013. Pp. 3380–3389.
11. Nehrir M. H., Wang C., Strunz K., Aki H., Ramakuma R., Bing J., Miao Z., & Salameh Z. A review of hybrid renewable/alternative energy Systems for Electric Power Generation: Configurations, control, and applications. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2(4). 2011. Pp. 392–403.
12. Mauli A., & Das D. Optimal power dispatch considering load and renewable generation uncertainties in an AC-DC hybrid microgrid. *IET Generation Transmission and Distribution*, 13(7). 2019. Pp. 1164–1176.

## GENERAL REQUIREMENTS FOR THE CONSTRUCTION AND OPERATION OF HYBRID MICROGRIDS IN DISTRIBUTION NETWORKS

A. Zharkin<sup>1</sup>, S. Palachov<sup>1</sup>, V. Popov<sup>2</sup>, V. Tkachenko<sup>2</sup>, I. Frolov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> – Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine, pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine

<sup>2</sup> – National Technical University of Ukraine «I. Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», pr. Peremohy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine

e-mail: [tig@ukr.net](mailto:tig@ukr.net)

*The article substantiates the expediency of forming hybrid microgrids that can be integrated into a centralized power supply system or operate autonomously in order to expand the use of renewable energy sources and prevent their possible negative impact on electrical network modes. A two-level approach to managing the operation of a hybrid microgrid is proposed, which involves a preliminary planning stage based on forecasted loads, output power of renewable generation sources, market price of electric energy, and a stage of operational control based on data obtained in real time. A number of objective functions and constraints are proposed to solve the task of optimal planning of the operation of a hybrid microgrid as a multicriteria problem. At the same time, the possibility of transforming this problem into a monocriteria one is substantiated. An analysis of the advantages and disadvantages of each of the proposed approaches was carried out. Ref. 12.*

**Keywords:** distributed generation, distribution networks, microgrids, energy storage, multicriteria optimization.

1. Muruganantham B., Gnanadass R., Padhy N. Challenges with renewable energy sources and storage in practical distribution systems. *Renew Sustain Energy Rev.* 2017. Vol.73. Pp. 125–134. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.089>
2. Blinov I., Trach I., Parus Y., Khomenko V., Kuchanskyy V., Shkaruplyo V. Evaluation of The Efficiency of The Use of Electricity Storage Systems in The Balancing Group and The Small Distribution System. *IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. Kharkiv, Ukraine, September 13-17, 2021. Pp. 262–265. DOI: <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek53812.2021.9569981>
3. Kyrylenko O.V., Blinov I.V., Parus Ye.V., Trach, I.V. 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)
4. Parus E. V., Blinov I. V., Olefir D. O. Evaluation of the economic effect of the provision of balancing services by electric energy storage systems in the UES of Ukraine. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiku NAN Ukrainy*. 2021. No 60. Pp. 28–37. (Ukr)
5. Murty V. V. S. N., Kumar Ashwani. Multi-objective energy management in microgrids with hybrid energy sources and battery energy storage systems, *Protection and Control of Modern Power Systems*. 2020. No 5. 2. DOI: <https://doi.org/10.1186/s41601-019-0147-z>
6. Alharbi W., Raahemifar K. Probabilistic coordination of microgrid energy resources operation considering uncertainties *Electric Power Systems Research* 128. 2015. Pp. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2015.06.010>
7. Chen S., Gooi H.B., Wang M. Sizing of energy storage for microgrids. *IEEE Trans. Smart Grid* 3, 2012. Pp. 142–151. DOI: <https://doi.org/10.1109/TSG.2011.2160745>
8. Walied Alharbi, Kaamran Raahemifar Probabilistic coordination of microgrid energy resources operation considering uncertainties *Electric Power Systems Research* 125. 2015. Pp. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2015.06.010>
9. Palma-Behnke R., Benavides C., Lanas F., Severino B., Reyes L., Llanos J., and Sáez D. A Microgrid Energy Management System Based on the Rolling Horizon Strategy. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 4(2). June 2013. Pp. 996–1006. DOI: <https://doi.org/10.1109/TSG.2012.2231440>
10. Jiang Q., Xue M. and Geng G. Energy management of microgrid in grid-connected and stand-alone modes. *IEEE Transactions on Power Systems*. 28(3) Aug. 2013. Pp. 3380–3389. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2013.2244104>
11. Nehrir M. H., Wang C., Strunz K., Aki H., Ramakuma R., Bing J., Miao Z., & Salameh Z. A review of hybrid renewable/alternative energy Systems for Electric Power Generation: Configurations, control, and applications. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. 2(4). 2011. Pp. 392–403. DOI: <https://doi.org/10.1109/TSTE.2011.2157540>
12. Maulik A. & Das D. Optimal power dispatch considering load and renewable generation uncertainties in an AC-DC hybrid microgrid. *IET Generation Transmission and Distribution*, 13(7), 2019. Pp. 1164–1176. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2018.6502>

Надійшла: 03.10.2022

Прийнята: 28.10.2022

Submitted: 03.10.2022

Accepted: 28.10.2022

## QUASI-DYNAMIC MODEL OF THE INTERCONNECTED POWER SYSTEM OF UKRAINE FOR A FREQUENCY STABILITY STUDY

V.V. Pavlovsky<sup>\*</sup>, L.M. Lukianenko<sup>\*\*</sup>, A.O. Steliuk<sup>\*\*\*</sup>, P.S. Horoshko<sup>\*\*\*\*</sup>

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

pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine

e-mail: [Lukianenko.Lukian@gmail.com](mailto:Lukianenko.Lukian@gmail.com)

*Significant integration of renewables into Ukraine's interconnected power system (IPS) requires developing the appropriate quasi-dynamic (QD) model to study power system operation in such conditions. The work aims to create a QD model of the IPS of Ukraine considering renewables and consumption profiles of the Ukrainian IPS for the winter and summer character days. The corresponding approach to such a model development is presented in the paper. The load flow series simulation results based on the quasi-dynamic approach are also shown. Additionally, the frequency stability study results for the Ukrainian power system are depicted. Ref. 6, fig. 6.*

**Keywords:** quasi-dynamic model, interconnected power system, frequency stability, generation, load, simulation.

The significant installed capacity of the renewables and the development of the power system increase the demand for the accuracy of the power system model. Currently, the common practice is a simulation of the power system operation only for some character regimes, i.e., for winter and summer peak and off-peak. Such an approach allows the definition of the voltage levels and loading of the network elements only for such regimes. However, the obtained results do not identify the duration of these abnormal situations (voltage violations and elements overloadings). Thus, the quasi-dynamic (QD) model is needed to be developed for the required time frame to define the duration of such critical regimes and to identify the appropriate measures to mitigate them [1]. As some individual components of the QD Model were developed and well described [1], the purpose of this paper is a development of the complex QD model (on the example of IPS of Ukraine) considering the various renewable generations (including PV plants and windfarms), hydraulic and thermal power plants.

In the paper, the QD model of the interconnected power system (IPS) of Ukraine in DIgSILENT PowerFactory software has been developed. The need for such a model is caused by the integration of the IPS of Ukraine to ENTSO-e and the significant increase of the renewable capacity in the generation structure of the Ukrainian IPS [2]. Besides, one of the essential tasks is a frequency stability study of the IPS of Ukraine operating synchronously with ENTSO-e [3, 4].

The developed QD model covers the winter (including 24-hour-profile patterns) plus summer days (24-hour-curve). Thus, the total time frame covers 24+24=48-hour points. Below, the QD model development approach on the example of the winter day is presented, and the approach for the summer day is similar. It should be noted that the generation, load, and other data have been collected and used for the target year (due to the nondisclosure agreement and security reasons, some data are not displayed in the figures). The diagram describing the process of QD model development in PowerFactory software is depicted in Fig. 1.

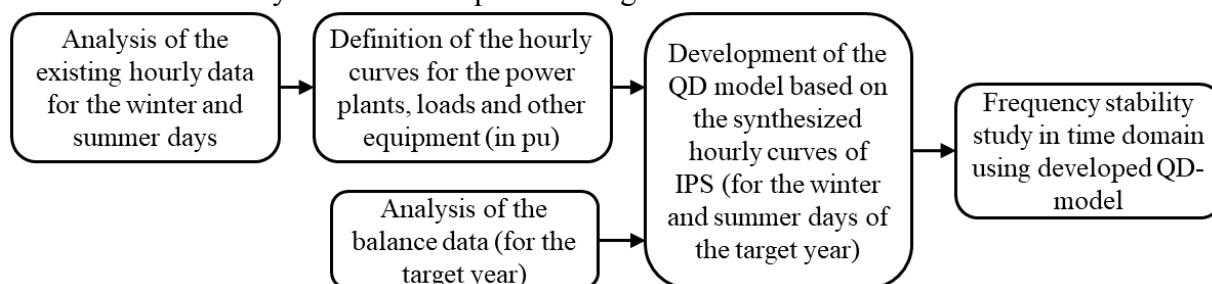


Fig. 1

The developed QD model of IPS of Ukraine includes the following data:

- generation schedules for the individual generators;
- load consumption curves;
- generation pattern of the renewable energy sources;
- position of the shunt reactor switches (switch-on or switch-off);
- position of the on-load tap-changers (OLTC) of the transformers.

Additional data on actual active power flows through the interface are also used to validate the developed QD model.

The initial data for the QD-model are generation profiles of the nuclear, thermal, and hydro-power plants and generation of the PV plants and windfarms (Fig. 1). Additionally, load profiles and mentioned above data should also be analyzed as well. Such an approach allows defining hourly curves for the generation power of the power plants, consumption (in per unit), and other statuses (switches, OLTC positions, statuses of the main equipment, etc.). Further, the mentioned data are used to create the synthesized hourly data (considering balances for the target year) for the QD model of the IPS of Ukraine (for the winter and summer days). As a result, an obtained QD model can be used for the frequency stability study for the 24-hour series or the specified hour.

It should be noted that for the  $i$ -time point, the balances of the active and reactive power must be provided. In particular, the balance of the active power can be presented as:

$$P_{\text{gen.sched},i} + P_{\text{gen.bal},i} = P_{\text{load},i} + P_{\text{loss},i}, i = 1 \dots n, \quad (1)$$

where:  $P_{\text{gen.sched},i}$  is a scheduled generation of the power plants covering the consumption of the power system;  $P_{\text{gen.bal},i}$  is a power providing the active power balance in the power system;  $P_{\text{load},i}$  is power system load (i.e., during the day);  $P_{\text{loss},i}$  defines losses of the active power. Thus, as (1) indicate, the active power balances are provided by the component  $P_{\text{gen.bal},i}$ , which can be defined as follows:

$$P_{\text{gen.bal},i} = P_{\text{load},i} + P_{\text{loss},i} - P_{\text{gen.sched},i}, i = 1 \dots n. \quad (2)$$

A consumption pattern has been synthesized for the target year to define a load curve, considering the consumption prognosis and prospective load profiles. Respectively, the load curve in absolute units (in MW) can be obtained by multiplying the power consumption values in p.u. by the maximum consumption value  $P_{\text{max}}$  for winter and summer days. The synthesized load profile for the winter day of the target year is presented in Fig. 2. As seen in Fig. 2, the minimum load is observed at 4:00, and the maximum load is at 19:00.

The appropriate generation structure has been determined to provide coverage of the consumption in IPS of Ukraine. Brief information on the power plant categories covering the consumption is provided below.

*Power plants of Category 1.* This category of power plants is presented by the nuclear power plants, which operate at the base of the load curve, and their generation is constant during the day.

*Power plants of Category 2.* PV plants and wind farms present this generation category. Considering the initial data, the appropriate generation curves of these power plants have been synthesized for the target winter and summer days [5, 6]. The resulting generation curves for PV plants and wind farms are depicted in Fig. 3 and 4, respectively. The generation of the PV plants has a traditional form with peak generation at midday; at the same time, the generation of the wind farms is more uniform due to the geographic distribution of the wind farms in the whole IPS of Ukraine. Due to the stochastic nature of PV plants and wind farms, the generation of these renewables is an additional disturbance

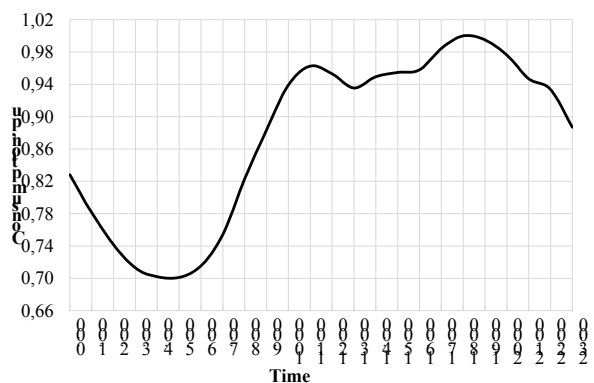


Fig. 2

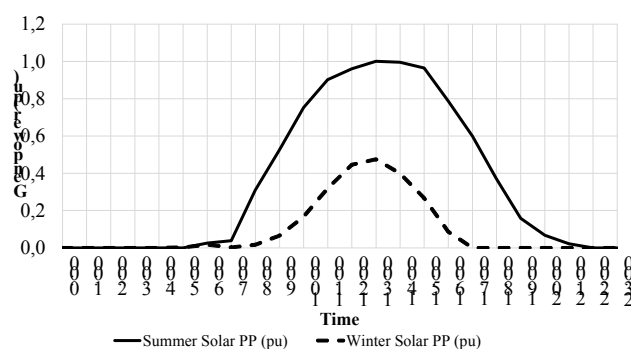


Fig. 3

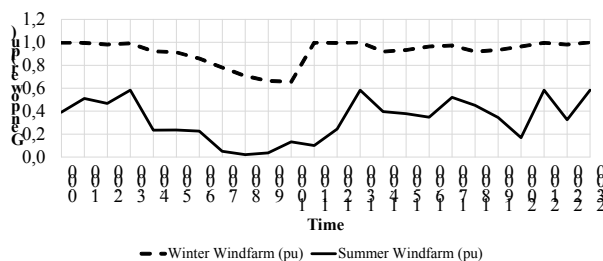


Fig. 4

days. The first curve type was applied to those units that are not switched off from the grid during the day. The second curve type of the TPP generation was used to simulate the cases of the generator disconnection from the grid during the day. It is necessary to consider the generator disconnection from the network during the minimum demand and its operation for the rest hours of the day.

*Power plants of Category 4.* This category is presented by hydropower plants (HPP) and power storage power plants (PSPP). Conventionally, this group of power plants can be divided into two types. Their schedule defines the generation of power plants of the first type during the day. The second type of power plant is presented by HPPs participating in the secondary frequency control. Thus, these HPPs aim to balance the power system between generation and consumption, considering these regulating power plants' active power operation limits. This generation corresponds to the component  $P_{\text{gen.bal},i}$  in (2).

The generation structure of the IPS of Ukraine, considering certain types of power plants, is presented in Fig. 5. As seen in Fig. 5, the total consumption in IPS of Ukraine is covered by thermal and hydropower plants.

The appropriate software module has been developed to adapt the developed QD model to study the power system stability in the time domain. This module was implemented as DPL-Script (build-in program language in PowerFactory) that converts QD initial data allowing to research the frequency stability (in "seconds" time frame) using the hourly resolution QD model of IPS of Ukraine. It should be noted that the developed QD model can be used to simulate the frequency stability of the IPS of Ukraine. To perform such calculations, the model was extended by considering the governor characteristics of the generating units participating in the primary frequency control, dynamic loads, and the detailed models of the under-frequency load-shedding relays.

The feature of this model is performing frequency stability study not only for the minimum and maximum loads but also for other hours considering current loads. This model is implemented in DIgSILENT PowerFactory software and can be used to study the IPS operation in load flow calculations and in time domain simulations for the specified hour or time frame. As an example, in Fig. 6 **Ошибка! Источник ссылки не найден.**, the simulation results of the frequency stability are presented for the winter day in the case of the 1000 MW generating unit disconnection at the

nuclear power plant. Such calculations are performed using the developed QD model of IPS of Ukraine. In Fig. 6, the frequency in IPS of Ukraine is depicted for each hour of the winter day (a total of 24 frequency curves). As seen, the sudden frequency change is observed below 49.2 Hz. This is due to UFLS action to prevent the operation of the special protection automatics of the generating units at nuclear power plants.

Thus, the QD model of IPS of Ukraine for the winter and summer target days has been developed in the PowerFactory software. The model can be used to study the operation of the

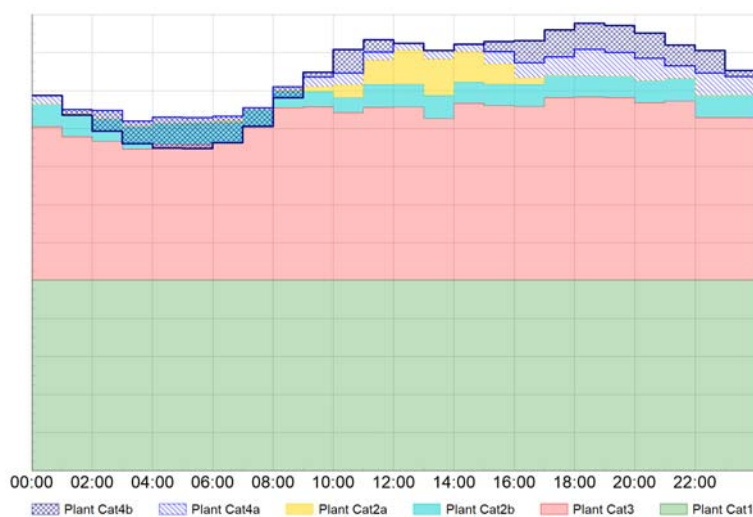


Fig. 5

Ukrainian IPS in load flow calculations. Besides, the frequency stability and primary frequency control simulation can also be performed. It should be noted that the developed QD model can also be used to study secondary frequency control. However, it requires consideration of the automatic generation control model. The model of such a control system will be developed and integrated into the QD model in future steps.

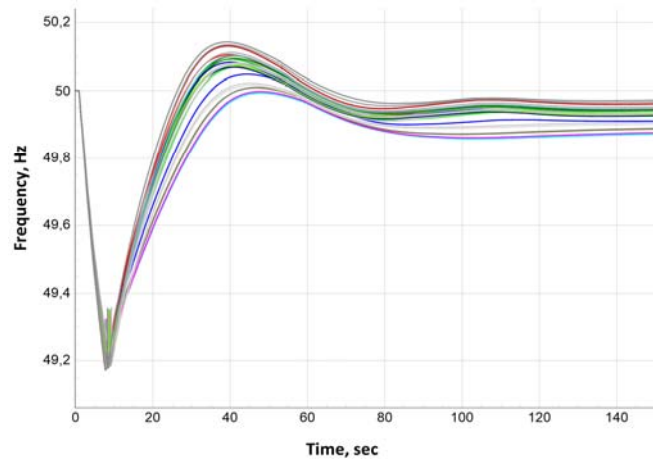


Fig. 6

Роботу виконано за держбюджетною темою: Розвиток елементів теорії, розроблення нових методів розрахунку та створення засобів для підвищення надійності та енергоефективності режимів і технологічних процесів в електроенергетичних та електротехнічних системах (шифр: Режим-1), що виконується за постановою Президії НАН України від 22.12.2021 №419 в рамках договору № 3-22 від 04.01.2022 р. Державний реєстраційний номер роботи 0122U001494, КІПКВК 6541230.

1. Lukianenko L., Steliuk A. New approach to simulation of extra-power solar plant with power evacuation by networks of the Chornobyl NPP. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2020. No 5. Pp. 65–69. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.05.065>
2. Pavlovsky V., Steliuk A. Local load-frequency control in the power system considering the impact of the renewables. International Conference on *Intelligent Energy and Power Systems*. Kyiv, Ukraine, June 7-11, 2016. Pp. 59–61. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEPS.2016.7521845>
3. Pavlovsky V., Steliuk A., Lenga O., Zaychenko V., Vyshnevskiy M. Frequency stability simulation considering under-frequency load shedding relays, special protection automatics, and AGC software models. *Proc. on IEEE PowerTech Conference*. Manchester, United Kingdom, June 18-22, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1109/PTC.2017.7981043>
4. Kyrylenko O., Pavlovsky V., Steliuk A., Vyshnevskiy M. Simulation of the normal and emergency operation of the interconnected power system of Ukraine for frequency stability study. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2017. No 2. Pp. 5–60. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2017.02.057>
5. Tao, J., Koster R. D., Reichle R. H., Forman B. A., Xue Y., Chen R. H. and Moghaddam M. 2019. Permafrost Variability over the Northern Hemisphere Based on the MERRA-2 Reanalysis. *Cryo*, 13, 2087–2110. DOI: [doi:10.5194/tc-13-2087-2019](https://doi.org/10.5194/tc-13-2087-2019)
6. Randles C. A., da Silva A., Buchard V., Colarco P. R., Darmenov A. S., Govindaraju R. C., Smirnov A., Ferrare R. A., Hair J. W., Shinozuka Y. Y. and Flynn C. 2017. The MERRA-2 Aerosol Reanalysis, 1980-onward, Part I: System Description and Data Assimilation Evaluation. *J. Clim*, 30, 6823–6850. DOI: [10.1175/JCLI-D-16-0609.1](https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0609.1)

УДК 621.311:681.3

# КВАЗИДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ ОЕС УКРАЇНИ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ СТІЙКОСТІ ЗА ЧАСТОТОЮ

**В.В. Павловський**, докт. техн. наук, **Л.М. Лук'яненко**, канд. техн. наук, **А.О. Стелюк**, канд. техн. наук, **П.С. Горшко**

Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна  
e-mail: [Lukianenko.Lukian@gmail.com](mailto:Lukianenko.Lukian@gmail.com)

Значна інтеграція відновлюваних джерел енергії в об'єднану енергетичну систему (ОЕС) України вимагає створення відповідної квазидинамічної моделі з метою дослідження режимів енергосистеми за таких умов. Метою роботи є розробка квазидинамічної моделі ОЕС України з урахуванням графіків генерації та споживання для характерних зимових та літніх днів. Представлено підхід зі створення зазначеної моделі. Крім того, також подано результати квазидинамічного моделювання усталених режимів ОЕС України. Додатково наведено результати дослідження стійкості ОЕС України за частотою з використанням створеної моделі вітчизняної ОЕС. Бібл. 6, рис. 6.

**Ключові слова:** квазидинамічна модель, об'єднана енергосистема, стійкість за частотою, генерація, споживання, моделювання.

Надійшла: 26.09.2022

Прийнята: 25.10.2022

Submitted: 26.09.2022

Accepted: 25.10.2022

**ТЕОРЕТИЧНА ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОФІЗИКА**

УДК 621.3.011

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2022.63.026>**ЗАЛЕЖНІСТЬ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ІМПУЛЬСНИХ СТРУМІВ ЕЛЕКТРОРОЗРЯДНИХ УСТАНОВОК ВІД ВІДДАЛЕНOSTІ ЇХНЬОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ**

**А.А. Щерба**<sup>1\*</sup>, чл.-кор. НАН України, **Н.І. Супруновська**<sup>1\*\*</sup>, докт. техн. наук,  
**М.А. Щерба**<sup>2\*\*\*</sup>, докт. техн. наук, **С.С. Розіскулов**<sup>1\*\*\*\*</sup>, **В.В. Михайленко**<sup>2\*\*\*\*\*</sup>, канд. техн. наук

<sup>1</sup> – Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна  
e-mail: [iednat1961@gmail.com](mailto:iednat1961@gmail.com).

<sup>2</sup> – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»,  
пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна  
e-mail: [m.shcherba@gmail.com](mailto:m.shcherba@gmail.com)

*У роботі досліджено закономірності впливу віддаленості технологічного навантаження від електророзрядних установок (ЕРУ) з ємнісними накопичувачами електроенергії на динамічні характеристики імпульсних струмів у навантаженні. На основі проведення експериментальних досліджень було визначено особливості зміння таких динамічних характеристик ЕРУ, як середні швидкості наростання та спадання їхнього вихідного імпульсного струму за умови реалізації процесів об'ємного електроіскрового диспергування шару металевих гранул у діелектричних рідинах між електродами. Проведено аналіз впливу довжини таких типів з'єднувальних електропровідників, як вита пара, коаксіальний кабель і літцендрат з біфілярною намоткою струмопровідних жил, на вихідні динамічні характеристики ЕРУ. Встановлено суттєвий вплив типу з'єднувальних провідників значної довжини на вказані характеристики, особливо за незначної індуктивності контуру навантаження ЕРУ. Обґрунтовано, що у випадку значного віддалення (в декілька метрів) технологічного навантаження від ЕРУ цілком доцільним є використання силових кабелів з твердою полімерною електричною ізоляцією як з'єднувальних провідників коаксіального типу. Бібл. 10, рис. 2, табл. 2.*

**Ключові слова:** імпульсний струм, електророзрядна установка, швидкість наростання струму, тривалість спадання струму, малоіндуктивні провідники струму.

Однією з основних проблем удосконалення формувачів імпульсних струмів (ФІ) електророзрядних установок (ЕРУ) є підвищення таких вихідних динамічних характеристик ЕРУ, як швидкість наростання їхніх вихідних струмів розряду та зменшення загальної тривалості розрядно-імпульсних струмів у технологічному навантаженні. Найвищі електродинамічні характеристики в навантаженні забезпечують ФІ, які використовують проміжні ємнісні накопичувачі електроенергії (ЄНЕ) [1–3]. Такі ФІ використовує більшість ЕРУ, в тому числі й для реалізації технологічних процесів об'ємного електроіскрового диспергування (ОЕІД) шару металевих гранул у діелектричних рідинах [4–6].

Зважаючи на те, що при протіканні розрядно-імпульсних струмів у навантаженні активна електрична потужність виділення в ньому електроенергії є прямо пропорційною величині його активного опору та квадратичному значенню розрядно-імпульсного струму, для збільшення силових впливів на технологічне навантаження необхідно здійснювати підвищення максимальних значень розрядних струмів та швидкості їхнього наростання навіть при формуванні імпульсних струмів малої тривалості [6–8]. Зокрема, в установках ОЕІД металів у діелектричних рідинах збільшенням швидкості наростання розрядних струмів і зменшенням їхньої тривалості зменшують максимальні розміри отримуваних іскроерозійних порошків [6, 7, 9].

При реалізації промислових технологій ОЕІД шару металевих гранул технологічне навантаження може бути на значній відстані (в декількох метрах) від ФРІ ЕРУ для забезпечення необхідних умов електробезпеки в обслуговуванні ЕРУ. У такому випадку на тривалість розрядних імпульсних струмів будуть суттєво впливати величини електричного активного опору навантаження та індуктивності з'єднувальних провідників розрядного контуру ФРІ.

Тому **метою даної роботи** є дослідження впливу різних з'єднувальних провідників значної довжини на динамічні характеристики розрядних імпульсних струмів у навантаженні електророзрядних установок ОЕІД металів та обґрунтування доцільності вибору типу провідників для розрядного контуру ФРІ ЕРУ з ємнісними накопичувачами електроенергії.

У роботі було проведено експериментальне дослідження для визначення впливу різних типів з'єднувальних провідників на динамічні характеристики розрядного імпульсного струму в експериментальній установці ОЕІД металів.

Оскільки опір іскроерозійного навантаження може стохастично змінюватися в процесі розряду, то для аналізу перехідних процесів у розрядному колі ФРІ вводилося ефективне значення активного опору іскроерозійного навантаження  $R_n = \text{const}$ , на якому за час одного розрядного імпульсу розсіюється така ж енергія, як і на реальному опорі шару струмопровідних гранул [10].

На рис. 1 наведено електричну принципову схему розрядного кола ЕРУ з іскроерозійним навантаженням, представленим резистором  $R_n = \text{const}$ . У експерименті використовувався високочастотний IGBT транзистор як повністю керований напівпровідниковий комутатор  $K$ . Власні індуктивність і активний опір розрядного кола представлено значеннями  $L_{pk}$  і  $R_{pk}$ . Індуктивність і активний опір додаткових з'єднувальних провідників значної довжини, якими ФРІ підключається до навантаження  $R_n$ , представлено відповідними значеннями  $L_{zp}$  і  $R_{zp}$ . У розрахунках приймалися припущення, що всі напівпровідникові елементи є ідеальними (тобто їхні активні опори у відкритому стані приймалися рівними нулю) і комутація здійснювалася миттєво.

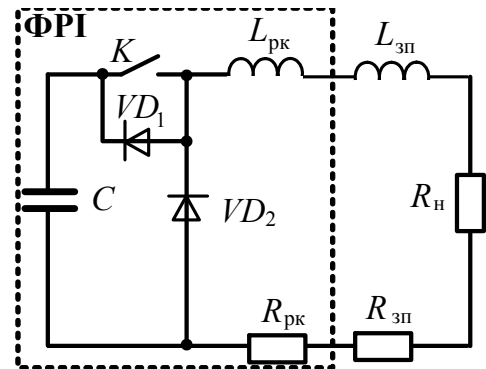


Рис. 1

З метою підвищення швидкості наростання імпульсного струму в навантаженні, в якості накопичувального конденсатора ФРІ було використано низькоімпедансний електростатичний конденсатор з великою ємністю (300 мкФ). Енергоемність такого конденсатора на декілька порядків перевищувала енергію, що віддавалась у навантаження протягом одного імпульсу струму (і напруга на виході ФРІ за цей час практично не змінювалась), тому при аналізі перехідних процесів у розрядному колі ЕРУ можна вважати, що напруга на виході ФРІ була незмінною  $U_{ФРІ} = \text{const}$ . Зважаючи на це, прийнято допущення, що перехідний процес після замикавання ключа  $K$  можна розглядати як підключення  $RL$ -кола до джерела постійної електро рушійної сили з напругою  $U_{ФРІ}$ .

Для проведення експериментальних досліджень використовувались: вимірювач струму, дільник напруги, двопроменевий запам'ятовувальний цифровий осцилограф НАМЕГ-НМ-1507 та з'єднувальні провідники типу вита пара, коаксіальний кабель та літцендрат з біфілярною намоткою струмопровідних жил. Вихідні електричні параметри та межі роботи такого ФРІ було визначено експериментальним шляхом. Індуктивність  $L_{pk}$  розрядного кола ФРІ було визначено автоколивальним методом, згідно з яким до вихідних клем ФРІ паралельно підключали  $RC$  ланцюг з відомими параметрами (які вибиралися такими, щоб у колі виникав коливальний процес без перенапруг). Експериментально визначено, що індуктивність складає  $L_{pk} = 0,46$  мкГн.

Активний опір розрядного кола  $R_{pk}$  визначався за методом короткого замикання. Для цього вихідні клеми ФРІ з'єднувались між собою короткою, яка проходила через вимірювальний трансформатор струму, приєднаний до осцилографа. З осцилограм визначалась постійна часу такого розрядного кола  $\tau$  ( $\tau = 37,08$  мкс), а розрахований опір становив  $R_{pk} = 12,4$  мОм.

Для визначення впливу різних з'єднувальних провідників на динамічні показники розрядних імпульсних струмів у навантаженні електророзрядних установок ОЕІД металів в умовах віддаленості ФРІ і навантаження таких установок було експериментально визначено параметри (індуктивності  $L_{зп}$  та активні опори  $R_{зп}$ ) цих з'єднувальних провідників. Досліджувалися провідники трьох типів: вита пара з мідними жилами  $2 \times 50 \text{ мм}^2$ , коаксіальний кабель перерізом жили і екрану  $70$  та  $16 \text{ мм}^2$  відповідно і літцендрат з біфілярною намоткою струмопровідних жил  $2 \times 7 \text{ мм}^2$ .

Для цього дані з'єднувальні провідники були приєднані до ФРІ. Їхні активні опори та індуктивності визначалися за тими ж методами, що використовувалися для розрахунку  $R_{рк}$  та  $L_{рк}$  (застосовувались відповідно метод короткого замикання та автоколивальний метод). Індуктивність  $L_{зп}$  визначалася як

$$L_{зп} = T^2 / (4\pi^2 C_1 - L_{рк}), \quad (1)$$

де період автоколивань  $T$  визначався з осцилограм, а  $C_1 = 0,15 \text{ мкФ}$  – відома ємність низькоімпедансного конденсатора, що під'єднувався до з'єднувальних провідників замість навантаження.

Опір  $R_{зп}$  розраховувався за формулою

$$R_{зп} = ((L_{рк} + L_{зп}) / \tau_2) - R_{рк}, \quad (2)$$

де  $\tau_2$  – постійна часу розрядного кола ФРІ з урахуванням з'єднувальних провідників та без навантаження, яка визначалася з осцилограм.

Результати розрахунків індуктивностей і активного опору з'єднувальних провідників наведено у табл. 1. З неї видно, що найкращі показники з індуктивності струмопровідних жил має літцендрат з біфілярною намоткою струмопровідних жил. Коаксіальний кабель має значно меншу індуктивність порівняно з витю парою, але більшу порівняно з літцендратом з біфілярною намоткою струмопровідних жил. Тоді як показник по активному опору навпаки найкращий у виті пари. Коаксіальний кабель має більший опір, ніж вита пара, але менший, ніж літцендрат. На значення струму і швидкість його зміння впливає як величина індуктивності,

Таблиця 1

| Параметри<br>Тип провідника | Період автоколивань<br>$T$ , мкс | Індуктивність,<br>$L_{зп}$ , мкГн | Постійна часу кола<br>$\tau_2$ , мкс | Активний опір $R_{зп}$ ,<br>мОм |
|-----------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|
| Вита пара                   | 4,22                             | 2,547                             | 131,15                               | 11                              |
| Коаксіальний кабель         | 2,68                             | 0,752                             | 44,46                                | 15                              |
| Літцендрат                  | 1,88                             | 0,114                             | 19,46                                | 17                              |

так і величина активного опору з'єднувальних провідників. Збільшення активного опору та індуктивності зменшує максимально можливий струм і швидкість його зміння у навантаженні, проте ступінь таких впливів є різною. Тому було проведено експериментальне дослідження режимів роботи ЕРУ для визначення динамічних показників (швидкостей наростання та спадання розрядних імпульсних струмів у навантаженні) при з'єднанні ФРІ і навантаження таких установок за допомогою розглянутих вище з'єднувальних провідників.

Осцилограми струму в резистивному навантаженні  $R_{н} = 1 \text{ Ом}$ , з'єднаному з ФРІ за допомогою виті пари, коаксіального кабелю та літцендрату, показано відповідно на рис. 2 а, б, в.

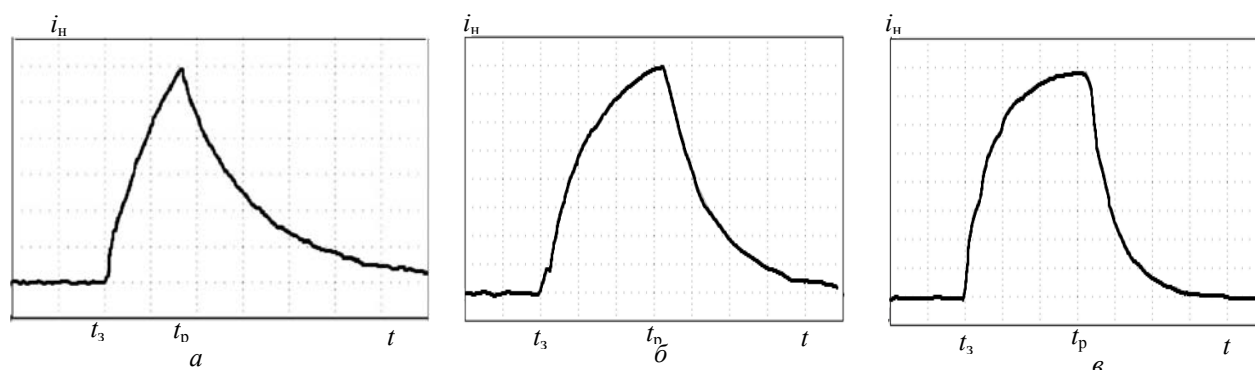


Рис. 2

Тривалість наростання струму (час  $\Delta t = t_p - t_3$  між замиканням і розмиканням ключа  $K$ ) становила 3,25 мкс. Вихідна напруга ФРІ становила 400 В. Ціна поділок по осі  $x$  на рис. 2 *a* складала 2 мкс/под., а на рис. 2 *б, в* – 1 мкс/под. По осі  $y$  ціна поділок для рис. 2 *a, б, в* – 50 А/под.

У табл. 2 наведено експериментальні результати динамічних характеристик: середніх швидкостей наростання імпульсних струмів у навантаженні за час  $\Delta t = 3,25$  мкс та спадання струму за той же час при з'єднанні ФРІ і навантаження трьома різними типами з'єднувальних провідників.

Із експериментальних і розрахункових значень, наведених у табл. 2, видно, що середня швидкість змінення струму при використанні літцендрату з біфілярною намоткою струмопровідних жил і коаксіального кабелю приблизно однакові. І хоча порівняно з літцендратом коаксіальний кабель має вищу індуктивність  $L_{зп}$  (див. табл. 2), але вона втричі нижча від індуктивності виті пари. Оскільки виготовлення літцендрату з біфілярною намоткою струмопровідних жил є надто трудомістким, а міцність його електроізоляції значно меншою за міцність сучасної ізоляції коаксіального кабелю, то на практиці більш доцільно як з'єднувальний провідник використовувати коаксіальний кабель.

**Висновки.** У роботі проведено експериментальне дослідження впливу таких з'єднувальних провідників, як вита пара, коаксіальний кабель та літцендрат з біфілярною намоткою струмопровідних жил, на динамічні характеристики електророзрядних установок, іскроерозійне навантаження яких повинно бути суттєво віддаленим від формувача розрядних імпульсів.

Було обґрунтовано, що при незначній (до 0,5 мкГн) власній конструктивній індуктивності електророзрядних установок для підключення суттєво віддаленого навантаження найбільш доцільним є використання силових коаксіальних кабелів із сучасною зшитою полімерною електроізоляцією, оскільки вони мають кращі динамічні характеристики (середні швидкості наростання та спадання розрядного імпульсного струму) і вищу міцність ізоляції.

Таблиця 2

| Параметри<br>Тип провідника      | $I_{max}$ ,<br>А | $I_{max}/\Delta t$ ,<br>А/мкс |
|----------------------------------|------------------|-------------------------------|
| Вита пара                        | 300              | 92                            |
| Коаксіальний кабель              | 400              | 123                           |
| Літцендрат з біфілярною намоткою | 390              | 120                           |

Роботу виконано за держбюджетною темою "Розвинути теорію імпульсних і високочастотних перехідних електромагнітних процесів у енергетичних і технологічних резонансних установках та високовольтних кабельних лініях електропередачі" (Шифр "ЕЛКАБ").

1. Лившиц А.Л., Отто М.Ш. *Импульсная электротехника*. М. Энергоатомиздат, 1983. 352 с.
2. Дубовенко К.В. Моделирование зарядных цепей емкостных накопителей энергии со звеном повышенной частоты. *Електротехніка і електромеханіка*. 2006. № 3. С. 58–63.
3. Shcherba A.A., Suprunovska N.I. Electric Energy Loss at Energy Exchange Between Capacitors as Function of Their Initial Voltages and Capacitances Ratio. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2016. No 3. Pp. 9–11. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.03.009>.
4. Nguyen P.K., Sungho J., Berkowitz A.E. MnBi particles with high energy density made by spark erosion. *J. Appl. Phys.* 2014. Vol. 115. Iss. 17. Pp. 17A756-1. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4868330>.
5. Ochir P., Gilchuk A.V., Monastyrsky G.E., Koval Y., Shcherba A.A., Zaharchenko S.N. Martensitic Transformation in Spark Plasma Sintered Compacts of Ni-Mn-Ga Powders Prepared by Spark Erosion Method in Cryogenic Liquids. *Materials Science Forum*, vol. 738–739, Trans Tech Publications, Ltd., Jan. 2013. Pp. 451–455. doi:10.4028/www.scientific.net/msf.738-739.451.
6. Щерб А.А., Супруновская Н.И., Синицын В.К., Иващенко Д.С. Аперидические и колебательные процессы разряда конденсатора при принудительном ограничении длительности токов в нагрузке. *Технічна електродинаміка*. 2012. № 3. С. 9–10.
7. Захарченко С.Н., Кондратенко И.П., Перекоз А.Е., Залуцкий В.П., Козірський В.В., Лопатко К.Г. Влияние длительности разрядных импульсов в слое гранул железа на размеры и структурно-фазовое состояние его электроэрозионных частиц. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2012. Т. 6. № 5(60). С. 66–72.
8. Kornev Ia., Saprykin F., Lobanova G., Ushakov V., Preis S. Spark erosion in a metal spheres bed: Experimental study of the discharge stability and energy efficiency. *Journal of Electrostatics*. 2018. Vol. 96. Pp. 111–118. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2018.10.008>.
9. Шидловська Н.А., Захарченко С.М., Перекоз А.О. Особливості розподілів за діаметрами отриманих за субмілісекундній тривалості розрядних імпульсів іскроерозійних частинок алюмінію і лунок на поверхні його гранул. *Технічна електродинаміка*. 2021. № 1. С. 10–22. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2021.01.0010>.

10. Вовченко А.И., Тертилов Р.В. Синтез емкостных нелинейно-параметрических источников энергии для разрядно импульсных технологий. Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування. 2010. № 4. С. 118–124.

## DEPENDENCE OF DYNAMIC CHARACTERISTICS OF PULSE CURRENTS OF ELECTRICAL DISCHARGE INSTALLATIONS ON THE DISTANCE OF THEIR TECHNOLOGICAL LOAD

A.A. Shcherba<sup>1</sup>, N.I. Suprunovska<sup>1</sup>, M.A. Shcherba<sup>2</sup>, S.S. Roziskulov<sup>1</sup>, V.V. Mihaylenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup> – Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,  
pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine

e-mail: [iednat1961@gmail.com](mailto:iednat1961@gmail.com)

<sup>2</sup> – National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",

pr. Peremohy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine

e-mail: [m.shcherba@gmail.com](mailto:m.shcherba@gmail.com)

*The paper investigates the influence of the distant technological load from electric discharge installations (EDIs) with capacitive storage of electricity on the dynamic characteristics of impulse currents in the load. On the basis of experimental studies, the peculiarities of changing the dynamic characteristics of EDIs, such as the average rate of rise and fall of their output pulse current during the implementation of volumetric spark dispersion of a layer of metal granules in dielectric liquids between electrodes, were determined. The influence of the length of such types of connecting conductors as twisted pair, coaxial cable, and litzendraht with bifilar winding of current-carrying conductors on the output dynamic characteristics of the EDI was analyzed. A significant influence of the type of connecting conductors of considerable length on the indicated characteristics has been established, especially in the case of a low-inductance of the load circuit of the EDI. It is substantiated that when the technological load is significantly distant (several meters) from the EDI, it is quite appropriate to use power cables with solid polymer electrical insulation as connecting conductors of the coaxial type. Ref. 10, fig. 2, tables 2.*

**Key words:** impulse current, electric discharge installation, rate of current rise, duration of current decrease, low-inductance current conductors.

1. Livshits A.L., Otto M.Sh. Impulse electrical engineering. Moskva: Energoatomizdat, 1983. 352 p. (Rus)
2. Dubovenko K.V. Simulation of capacitor storage charging circuits with a high frequency loop. *Elektrotekhnikata elektroenergetyka*. 2006. No 3. Pp. 58–63. (Rus)
3. Shcherba A.A., Suprunovska N.I. Electric Energy Loss at Energy Exchange Between Capacitors as Function of Their Initial Voltages and Capacitances Ratio. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2016. No 3. Pp. 9–11. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.03.009>.
4. Nguyen P.K., Sungho J., Berkowitz A.E. MnBi particles with high energy density made by spark erosion. *J. Appl. Phys.* 2014. Vol. 115. Iss. 17. Pp. 17A756-1. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4868330>.
5. Ochinnikov P., Gilchuk A.V., Monastyrsky G.E., Koval Y., Shcherba A.A., Zaharchenko S.N. Martensitic Transformation in Spark Plasma Sintered Compacts of Ni-Mn-Ga Powders Prepared by Spark Erosion Method in Cryogenic Liquids. *Materials Science Forum*, vol. 738–739, Trans Tech Publications, Ltd., Jan. 2013. Pp. 451–455. doi:10.4028/www.scientific.net/msf.738-739.451.
6. Shcherba A.A., Suprunovska N.I., Synytsin V.K., Ivashchenko D.S. Aperiodic and oscillatory processes of capacitor discharge at forced limitation of current duration in load. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2012. No 3. Pp. 9–10. (Rus)
7. Zakharchenko S.N., Kondratenko I.P., Perekos A.E., Zalutsky V.P., Kozyrsky V.V., Lopatko K.G. Influence of discharge pulses duration in a layer of iron granules on the size and structurally-phase conditions of its electro-erosion particles. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2012. Vol. 6. No 5 (60). Pp. 66–72. (Rus)
8. Kornev Ia., Saprykin F., Lobanova G., Ushakov V., Preis S. Spark erosion in a metal spheres bed: Experimental study of the discharge stability and energy efficiency. *Journal of Electrostatics*. 2018. Vol. 96. Pp. 111–118. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2018.10.008>.
9. Shydlovska N.A., Zakharchenko S.M., Perekos A.O. Peculiarities of the diameter distributions obtained at sub-millisecond duration of discharge pulses spark-erosive aluminum particles and caverns on the surface of its granules. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2021. No 1. Pp. 10–22. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2021.01.0010>. (Ukr)
10. Vovchenko A.I., Tertilov R.V. Synthesis of capacitive non-linear- parametrical energy sources for discharge-pulse technologies. *Zbirnyk naukovykh pratz Natsionalnogo universytetu korablebuduvannya*. 2010. No 4. Pp. 118–124. (Rus)

Надійшла: 04.08.2022

Прийнята: 15.08.2022

Submitted: 04.08.2022

Accepted: 15.08.2022

## ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ ТА АПАРАТИ

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2022.63.031>

### FEATURES OF THE DEVELOPMENT OF SLOTLESS BRUSHLESS MAGNETOELECTRIC TORQUE MOTORS

V.G. Kireyev<sup>\*</sup>, K.P. Akinin<sup>\*\*</sup>

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,  
pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine  
e-mail: [kvg2016@ukr.net](mailto:kvg2016@ukr.net)

*The structure of a brushless magnetoelectric torque motor with a slotless stator with a surface installation of permanent magnets on the rotor is considered. A motor model has been developed to calculate its characteristics in the COMSOL Multiphysics 6.0 software environment. The optimization of its structure was carried out, as a result of which the optimal number of pole pairs and such a ratio between the dimensions of the elements of the electromagnetic core of the motor were determined, at which the maximum electromagnetic torque per unit of power consumption is achieved. The paper also touches upon the problem of achieving the minimum value of the torque ripple factor in motors of a similar design. Ways of its solution are proposed both due to constructive changes in the magnetic system, and due to the synthesis of reference signals for the formation of such forms of currents in the stator phases, as a result of the interaction of which with the rotating magnetic field of the rotor, the motor torque characteristic with a minimum value of the ripple factor can be obtained. Ref. 6, fig. 11.*

**Key words:** brushless magnetoelectric torque motor, slotless stator, torque factor, torque ripple factor.

**Introduction.** A torque motor (TM) is an electromechanical converter of an input electrical signal of direct or alternating current into an electromagnetic torque, while the rotor rotates at low speed or is stationary. TM are used in cases where it is necessary to ensure the rotation of the payload with high torque with minimal torque ripple throughout the entire rotation range, as well as ensuring high dynamics in transients and accuracy in positioning mode. These motors are widely used as actuating elements in gyroscopic systems, antennas drives, telescopes, solar batteries, robots, machine tools, medical equipment, etc.

When developing control systems and choosing an actuating motor, ordinary electric motors with a gearbox can compete with TM, since they have less weight, energy consumption, and an electromechanical time constant. However, the presence of a gearbox implies the introduction of errors into the control system loop due to the inevitable presence of backlash and friction in them, thermal instability of mechanical properties, and low reliability of the drive, which makes it preferable to use TM. The main distinguishing features of TM in comparison with conventional electric motors are the relatively low angular speed of rotation of the rotor and the frameless design, that is, the absence of a housing, shaft and bearings [1]. The task of designing an TM is not only to ensure the characteristics of the motor in accordance with the terms of reference, but also to create a design that is best integrated into the system being developed. This explains the wide variety of TM designs and the need for optimal design of an electromechanical converter to achieve the desired characteristics.

**The purpose of the paper** is to develop approaches to designing slotless brushless magnetoelectric TM that have a maximum electromagnetic torque per unit of power consumption, as well as ways to reduce the torque ripple factor.

**The main material and study results.** The main characteristic of the TM, which determines the very name of the motor, is the dependence of the magnitude of the electromagnetic torque on the consumed current, which can be expressed through the ratio of the starting torque  $M_s$  to the current  $I_s$  in the stator winding in the starting mode, called the torque constant  $C_m$



$$C_m = M_s / I_s. \quad (1)$$

Since TM operate in the mode of positioning or slow rotation of the rotor, the main energy losses are dissipated in the stator winding, and the efficiency of converting electrical energy into mechanical energy depends on how well its parameters are chosen. Thus, the optimization task is to establish such a ratio between the sizes of the elements of the electromagnetic core of the motor, in which the maximum torque per unit of power consumption will be obtained. Previously, in [2, 3], a method for optimizing brushless motors with permanent magnets has already been described, and we can apply it to calculate the TM.

As an example, from the whole variety of TM designs, consider a brushless slotless magnetoelectric motor (Fig. 1), which consists of external 1 and internal 2 magnetic circuits, a three-phase stator winding 3 and permanent magnets of the rotor 4. Solving the problem of optimizing the configuration of the electromagnetic cores of the machine will be carried out taking into account a number of restrictions and assumptions, namely: the power dissipated in the winding  $P = 18W$  and the power supply voltage  $U = 36V$  are constant, the outer diameter of the stator  $D$  and the length of the active zone of the motor  $L_a$  are unchanged and equal to  $88mm$  and  $45mm$ , respectively, there is no saturation of the stator and rotor magnetic circuits and the maximum induction value in them remains constant for all variations in the size of the motor elements, the air gap between the stator and the rotor is  $0.5mm$ , the length of the brand H42SH magnet  $h_m$  along the magnetization axis is  $5mm$ . The target optimization function is the maximum starting electromagnetic torque  $M_s$ , and the arguments are the number of pairs of poles of the magnets  $p$  and the radial thickness of the winding  $b$ .

Since the power and supply voltage are constants, and all the consumed power is dissipated

in the winding, the current  $I$  and the resistance of the winding will also be constant. The fulfillment of the condition of constant resistance when changing the cross-sectional area of the active part of the stator coils is achieved by simultaneously changing the number of turns of the coils and the copper section of the winding wire. We assume that a simple loop three-phase winding is installed on the stator, connected to a star with an isolated zero. Then the formula for calculating the length of the average turn of the coil can be written as

$$L_{av} = 2 \left( L_a + 3,5b + \left( R_{st} + \frac{b}{2} \right) \frac{\pi}{p} \right), \quad (2)$$

where  $R_{st}$  is the inner radius of the stator winding. We express the number of turns of the coil through its geometric dimensions

$$W = \frac{\pi(2R_{st} + b)bk_r}{6pS_w}, \quad (3)$$

where  $k_r$  is the fill factor of the cross section of the coil with copper,  $S_w$  is the cross section of the winding conductor. Since, according to the accepted conditions, the current and the power dissipated in the winding are constants, the winding resistance can be expressed through these parameters

$$R_a = \frac{P}{I^2} = \frac{2p\rho L_{av}W}{S_w}, \quad (4)$$

where

$$W = \frac{PS_w}{2I^2 p \rho L_{av}}, \quad (5)$$

where  $\rho$  is the resistivity of the winding wire material. Equating the two expressions obtained for the number of turns of the coil  $W$ , we obtain the value of the cross section of the winding wire  $S_w$ , at which the condition of constancy of the dissipated power will be satisfied.

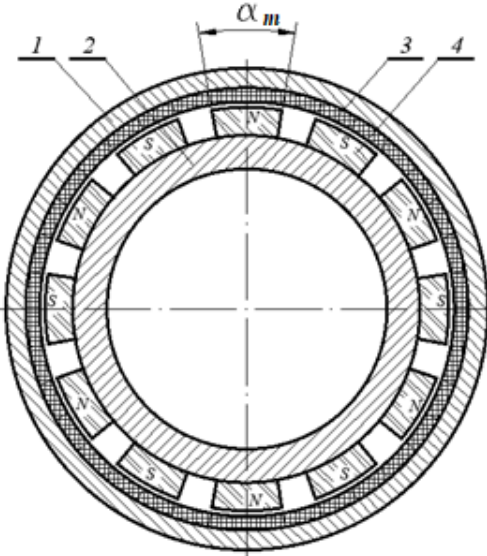


Fig. 1

$$S_w = \sqrt{\frac{\pi(2R_{st} + b)bk_r I^2 \rho L_{av}}{3P}}. \quad (6)$$

We will calculate the electromagnetic torque developed by the motor rotor using the Arcchio method implemented in the COMSOL Multiphysics 6.0 software package. Finding the torque value is possible both in two-dimensional and three-dimensional formulations, and the choice of one or another option depends on how much edge effects affect obtaining a reliable result, on the complexity of creating a model and setting up a solver, on calculation time, etc. The purpose of this article is to demonstrate an approach to designing an TM with optimal characteristics, as well as to demonstrate the influence of certain parameters on achieving the desired results, therefore, two-dimensional modeling is best suited for multivariate calculations, since this significantly reduces the calculation time. This reduction in time becomes especially noticeable when the vector magnetic potential is used in the problem, the necessity of using which is due to the choice of the Arcchio method. To verify the results obtained on a two-dimensional model, the values of magnetic induction in the motor gap were calculated with a change in its length, the number of poles and the length of the magnet in the environment of two-dimensional and three-dimensional modeling. The calculation error of the average value of induction in the working gap in the two-dimensional model  $\Delta B$  is determined in comparison with the three-dimensional one. Fig. 2 shows the dependence of the error  $\Delta B$  in percent when varying the number of motor poles and the length of the active part of the machine, expressed in relative units  $L_a/D_r$ , where  $D_r$  is the rotor diameter. Obviously, the main influence on the error in calculating the induction is the length of the active part of the machine, and the smaller it is, the higher the error.

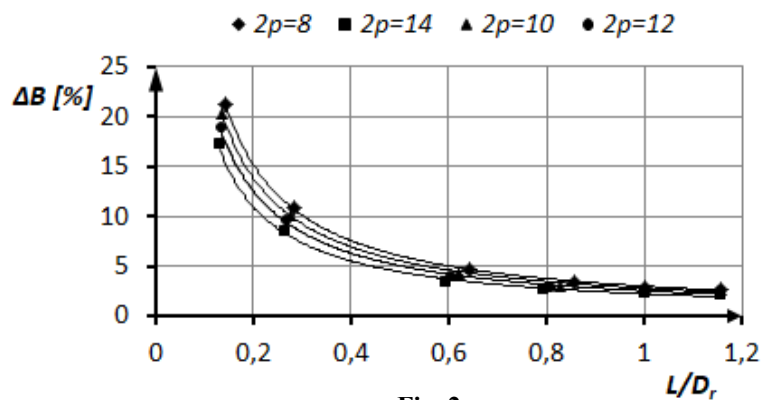


Fig. 2

The characteristics family of obtained graphs of the function  $\Delta B(2p, L/D_r)$  is described by the empirical expression

$$\Delta B = (-0,22p + 3,65)(L/D_r)^{-1,05}, \quad (7)$$

that allows you to calculate the error in calculating the value of the average induction in the working gap when modeling in two-dimensional space, as well as to correct the calculation of the magnetic induction and thereby take into account the leakage fluxes from the end parts of the machine

As already noted, the optimization of the TM magnetic system with the above initial data will be carried out in the environment of the COMSOL Multiphysics software package in a two-dimensional formulation with the connection of the optimization module. The search for the maximum value of the torque was carried out under the condition (6) of the constancy of the power dissipated in the winding and the fixed outer diameter of the stator magnetic circuit, and the adjustment of the induction value (7) was also used.

To generalize the results obtained in the simulation, we introduce the concept of the relative values of the length of the magnet  $h_m/D$  and the thickness of the winding  $b/D$ , which determine the geometric relationships between the elements of the magnetic system. This will make it possible to extend the results of calculations to geometrically similar machines in accordance with the provisions of the theory of similarity of magnetic systems [5]. The simulation results are presented in fig. 3 as a family of performance characteristics  $M_{max}(b/D)$  obtained for different values of the number of poles  $2p$ . Analysis of the simulation results shows that for a given configuration of the magnetic system and with a relative length of the magnet equal to 0.0568 units, the largest torque is achieved in the motor with the number of pole pairs  $p=7$  and the relative thickness of the winding  $b=0.0284$ . Then, in accordance with the theory of similarity, with an increase in all geometric dimensions by  $n$

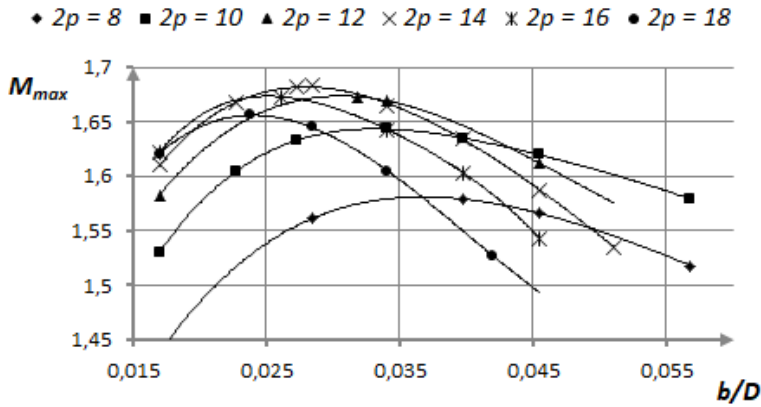


Fig. 3

value of the energy consumed. Similarly, TM of any other design with different winding manufacturing methods can be calculated.

Achieving the maximum starting torque for TM is one of the main tasks of their development. At the same time, an equally important task is also to achieve a minimum change in the motor torque relative to the set value when the rotor rotates. To compare torque motors by this indicator, it is customary to use the torque ripple factor, determined by the formula

$$K_r = \frac{M_{\max} - M_{\min}}{2M_{av}} 100\%, \quad (8)$$

where  $M_{\max}$ ,  $M_{\min}$ ,  $M_{av}$  are the maximum, minimum and average torque values, respectively. Figure 4 shows the calculated dependences of the values of the average value of the torque  $M_{av}$  and the torque ripple factor  $K_r$  of the optimized TM for a different number of pairs of poles  $p$ . There is an obvious tendency to reduce ripples as the number of motor poles increases, however, after reaching its maximum at  $2p = 14$ , the torque begins to decrease and the developer must make a decision on choosing the number of poles based on the requirements for TM.

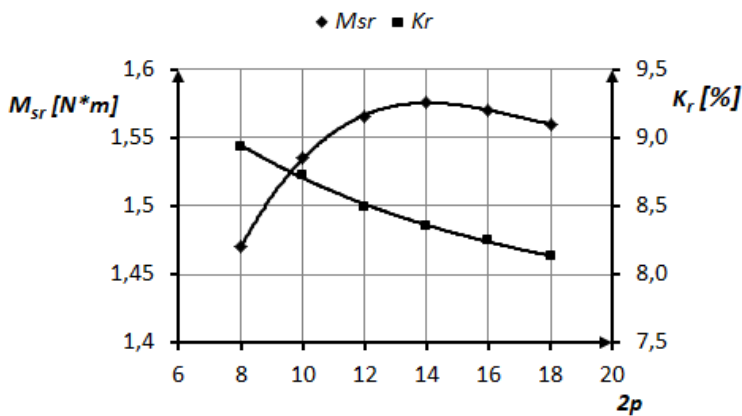


Fig. 4

ditional number of conductors connecting the motor to the control system and the cost of the TM with the control scheme are not decisive.

Let's consider one more possible approach to TM optimization. In the example considered in the paper, the angular size of the magnet is  $\alpha_m = 2\pi/3p$ . The same angular size is occupied by two sections of the stator windings (Fig. 1). When the rotor rotates, the windings are switched every 120 electrical degrees, which corresponds to the physical rotation of the rotor at an angle  $\varphi = \pi/3p$ . At each switching period, the pattern of the change in the magnitude of the moment is repeated, therefore, we restrict ourselves to calculating the moment only in the range from 0 to  $\pi/3p$ . Fig. 5 shows a family of graphs of the value of the motor torque with the number of poles  $2p=14$  when the angular size of the magnet  $\alpha_m$  changes from  $2\pi/3p$  to  $11\pi/12p$  with a step of  $\pi/12p$ .

times, the magnetic induction at all points of the magnetic system remains unchanged, and the magnetic flux increases by  $n^2$  times. Similarly, the current in the stator winding increases by  $n^2$  times. Accordingly, the electromagnetic torque will increase by  $n^4$  times.

The given example of calculation demonstrates the method for optimizing the TM magnetic system in order to achieve the maximum of the electromagnetic torque at a fixed

In modern TM, torque ripples do not exceed 6÷10 %, therefore, we will further consider possible ways to reduce the torque ripple factor for brushless magnetolectric motors with a slotless stator. One of the possible ways to reduce the ripple is the profiling of the pole or the pole piece [4], but in this case, as in the previous case the goal is achieved by reducing the torque. Quite effectively you can reduce the ripple by increasing the number of motor phases. Such a solution can be resorted to in special cases, when the ad-

The nature of the change in the moment  $M_{av}$  and the torque ripple factor  $K_r$  depending on the angular size of the magnet  $\alpha_m$  is shown in fig. 6. It can be seen from the graphs that an increase in the angle  $\alpha_m$  leads to a decrease in pulsation from 8.4 % to 5.6 % if the angular size of the magnet is equal to the value of the pole division. In this case, the average torque value increases by 11 %. An increase in the moment value is due to both a change in the geometry of the magnet and an increase in the volume of the magnetic material. To numerically estimate the influence of each of the factors on the torque value, the motor was calculated with the number of poles  $2p = 14$  and the angular size of the magnet  $11\pi/12p$ , provided that the volume of the magnet remained the same as at the angle  $\alpha_m = 2\pi/3p$ . The calculation showed an increase in the magnitude of the moment by 3.1 %, and the torque ripple factor was 5.9 %.

In brushless TM, the windings are switched using a voltage inverter according to the signals of the rotor position sensors. If you pay attention to the nature of the change in the magnitude of the torque during the switching period (Fig. 5), then the motor develops the smallest torque at the edges of the presented angular interval, in which case an additional way to reduce ripples in the torque curve can be the formation of stator currents in a certain way. Next, consider the mode of slow rotation of the simulated motor and possible ways of generating currents in the winding. For definiteness, it can be noted that the operating angular speed of the considered TM has a value of  $2 \text{ rad/s}$ .

Since for the TM, a special condition for their operation is the absence of any variable component in the curve of their torque characteristic, we will consider various variants for the formation of torque characteristics of TM to select the optimal solution.

The idea of forming the stator currents in a certain way to reduce torque ripples is known, and one of the particular cases of current formation is described in [6]. In this article, the authors, if possible, generalized possible approaches to solving this problem.

Further, we will consider the forms of writing equations in relative units. For a three-phase brushless magnetoelectric motor, its torque characteristic is the sum of three terms of the phase torque characteristics, which are determined as the result of the interaction of the rotating magnetic field of the rotor with the system of alternating currents in the stator windings

$$M^*(\alpha) = M_A^*(\alpha) + M_B^*(\alpha) + M_C^*(\alpha); \quad (9)$$

$$M_A^*(\alpha) = i_A^*(\alpha)b_A^*(\alpha); \quad M_B^*(\alpha) = i_B^*(\alpha)b_B^*(\alpha); \quad M_C^*(\alpha) = i_C^*(\alpha)b_C^*(\alpha), \quad (10-12)$$

where  $M_A^*(\alpha)$ ,  $M_B^*(\alpha)$ ,  $M_C^*(\alpha)$  are the phase torque characteristics of the motor, which are functions of the electric angle  $\alpha$  of rotor rotation;  $i_A^*(\alpha)$ ,  $i_B^*(\alpha)$ ,  $i_C^*(\alpha)$  and  $b_A^*(\alpha)$ ,  $b_B^*(\alpha)$ ,  $b_C^*(\alpha)$  are three-phase systems of stator currents and rotor field induction in relative units.

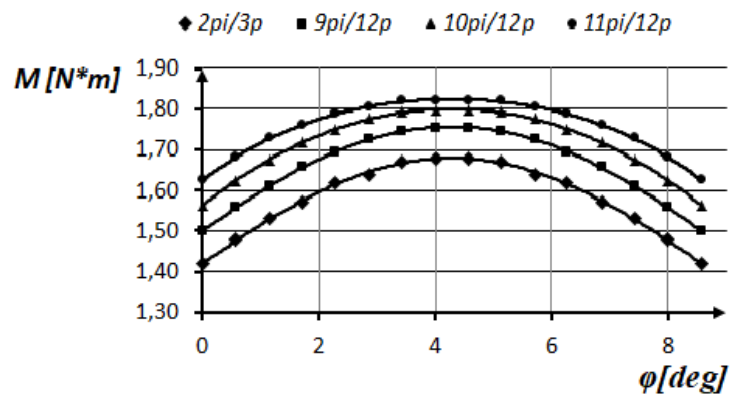


Fig. 5

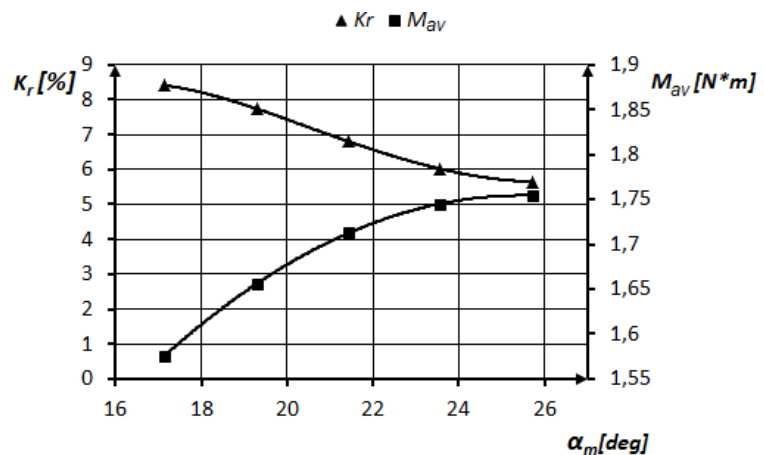


Fig. 6

Further, we will give expressions for phase variables only for phase A, assuming the considered motor is symmetrical.

To fulfill the condition for the absence of a variable component in the torque characteristic curve, it is necessary to select such types of functions to describe the phase torque characteristics of the motor (10-12) so that their sum is always equal to a constant value. The same condition must be met for the rotor field induction curve  $b_A^*(\alpha)$  obtained as a result of the optimization, shown in Fig. 7. It can be seen that this curve is quite different from the sinusoidal form.

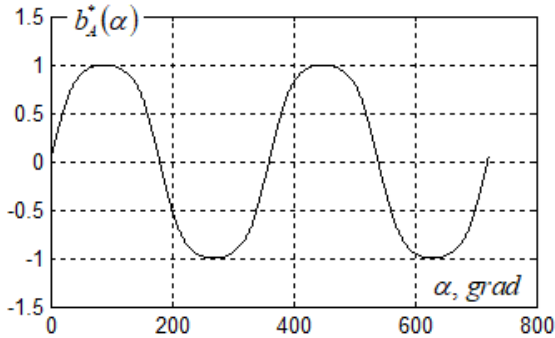


Fig. 7

It is known that the absence of a variable component in the curve of the moment characteristic of the motor is achieved by the interaction of the sinusoidal phase curves of the stator currents and the induction of the rotor field. In this case, the torque characteristic for phase A and the torque characteristic of the moto (9) in relative units have the form

$$M_A^*(\alpha) = \sin^2 \alpha \text{ and } M_s^*(\alpha) = 1,5. \quad (13, 14)$$

Fig. 8a shows these characteristics.

This article does not consider the formation of motor stator currents with the help of semiconductor frequency converters. We are only talking about the synthesis of reference signals of currents for their further formation, that is, we will assume that the relative variables of the reference signals and the currents themselves coincide and, at the same time, have the same designations  $i_A^*(\alpha)$ ,  $i_B^*(\alpha)$  and  $i_C^*(\alpha)$ .

The idea of synthesizing the forms of the stator phase current curves  $i_A^*(\alpha)$ ,  $i_B^*(\alpha)$  and  $i_C^*(\alpha)$  is that when they interact with the given angular distributions of induction  $b_A^*(\alpha)$ ,  $b_B^*(\alpha)$  and  $b_C^*(\alpha)$  such phase torque characteristics of the motor (10-12) are formed, by summing which the desired torque characteristic of a three-phase motor can be obtained in form (14).

In this case, we obtain a formula for determining the phase A stator current curve

$$i_A^*(\alpha) = \frac{M_A^*(\alpha)}{b_A^*(\alpha)}. \quad (15)$$

Fig. 8b shows the resulting stator phase current curve. In this case, we have the effective value of the stator current  $I = 0,6491$  A.

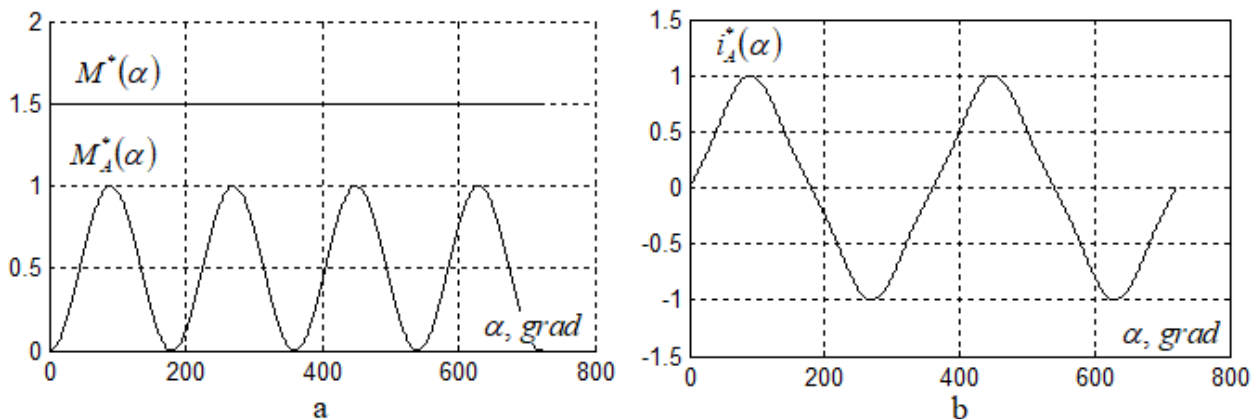


Fig. 8

The fulfillment of condition (14) is possible not only when the phase torque characteristic of the form (13) is realized, but also for some other forms. For example, Fig. 9 shows two variants similar to those described above for given forms of trapezoidal (a, b) and rectangular (c, d) phase torque characteristics  $M_A^*(\alpha)$ . The current forms were obtained in accordance with (15). In this

case, the stator current effective values for these two variants are equal  $I = 0,6501 A$  and  $I = 0,682 A$ , respectively.

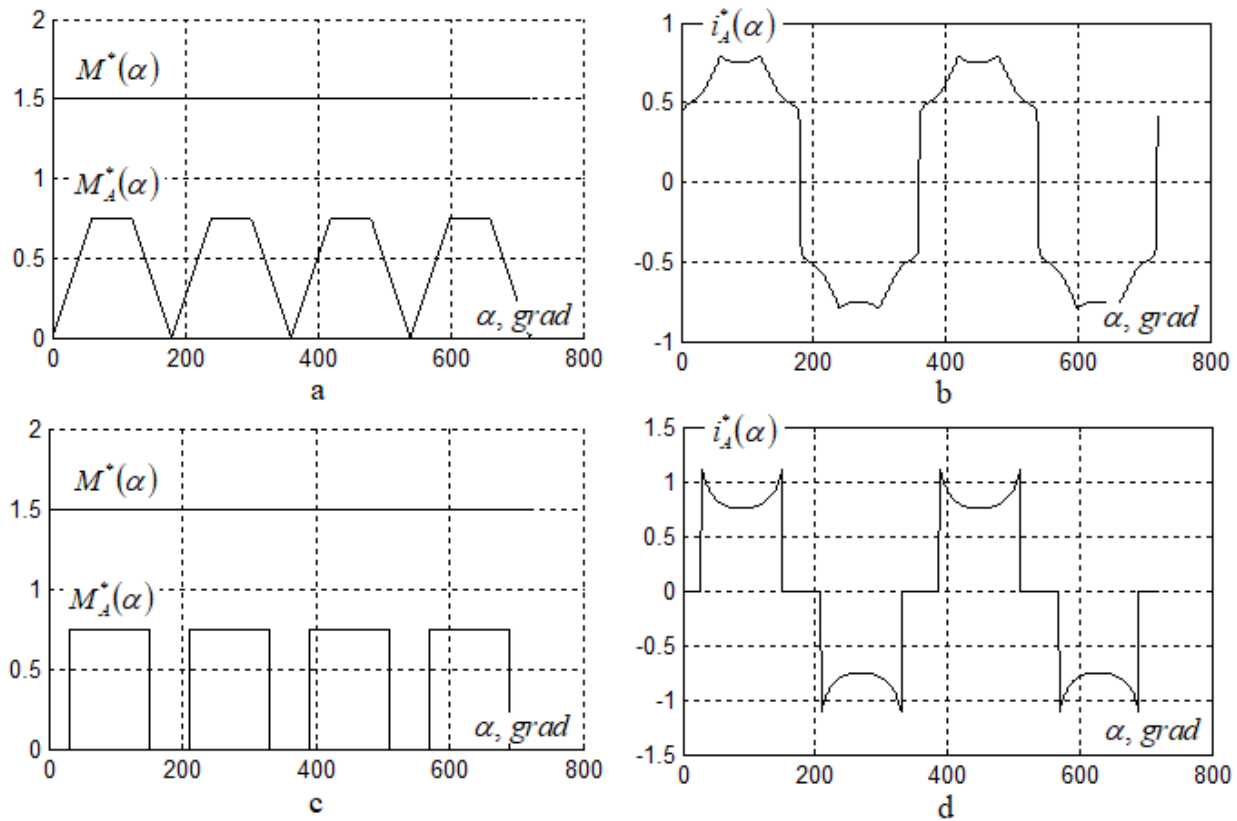


Fig. 9

A simpler way to obtain the torque characteristic of the motor of the form (14) is possible when the stator currents are formed, provided that the current flows in each half-cycle for only 120 electrical degrees. For phase A, we write the angular function, which is determined on one period of the electric angle of rotation  $0 < \alpha < 360$ ,

$$\begin{aligned} y_A^*(\alpha) &= 0 \text{ at } \alpha < 30; \\ y_A^*(\alpha) &= 1 \text{ at } 30 < \alpha < 150; \\ y_A^*(\alpha) &= 0 \text{ at } 150 < \alpha < 210; \\ y_A^*(\alpha) &= -1 \text{ at } 210 < \alpha < 330; \\ y_A^*(\alpha) &= 0 \text{ at } 330 < \alpha < 360. \end{aligned} \quad (16)$$

We write an intermediate function for a three-phase symmetrical system

$$y^*(\alpha) = y_A^*(\alpha)b_A^*(\alpha) + y_B^*(\alpha)b_B^*(\alpha) + y_C^*(\alpha)b_C^*(\alpha), \quad (17)$$

as well as its inverse function

$$x^*(\alpha) = \frac{1,5}{y^*(\alpha)}. \quad (18)$$

Finally, we define the desired current in phase A as

$$i_{AR}^*(\alpha) = x^*(\alpha)y_A^*(\alpha). \quad (19)$$

The curves of the phase and total torque characteristics of the motor, as well as the current curve, are shown in Fig. 10, and its effective value is  $I = 0,6721 A$ . The substitution of three phase currents in formula (9) made it possible to implement the torque characteristic of the motor of the form (14).

In addition to the considered cases in which condition (14) is satisfied, we will also consider simpler variants from the point of view of their implementation. Fig. 11 shows the curves of the variants for forming the torque characteristics of the motor for sinusoidal (a, b), rectangular (c, d) and trapezoidal (e, f) currents. In this case, the stator current effective values and the values of the

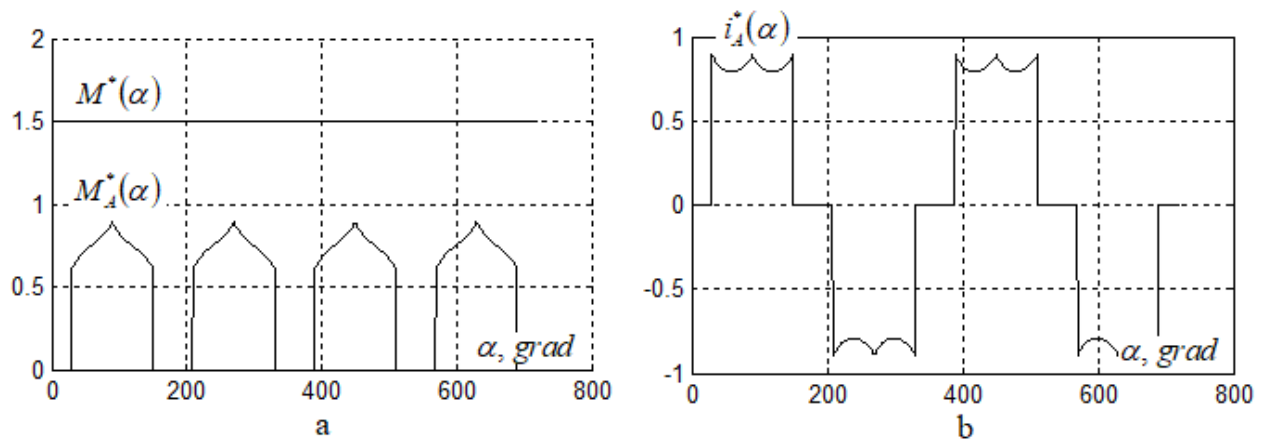


Fig. 10

torque ripple factor (8) for these three variants, respectively  $I = 0,6395 A$ ,  $I = 0,671 A$ ,  $I = 0,6405 A$  and  $K_r = 1,326\%$ ,  $K_r = 5,47\%$ ,  $K_r = 6,02\%$ .

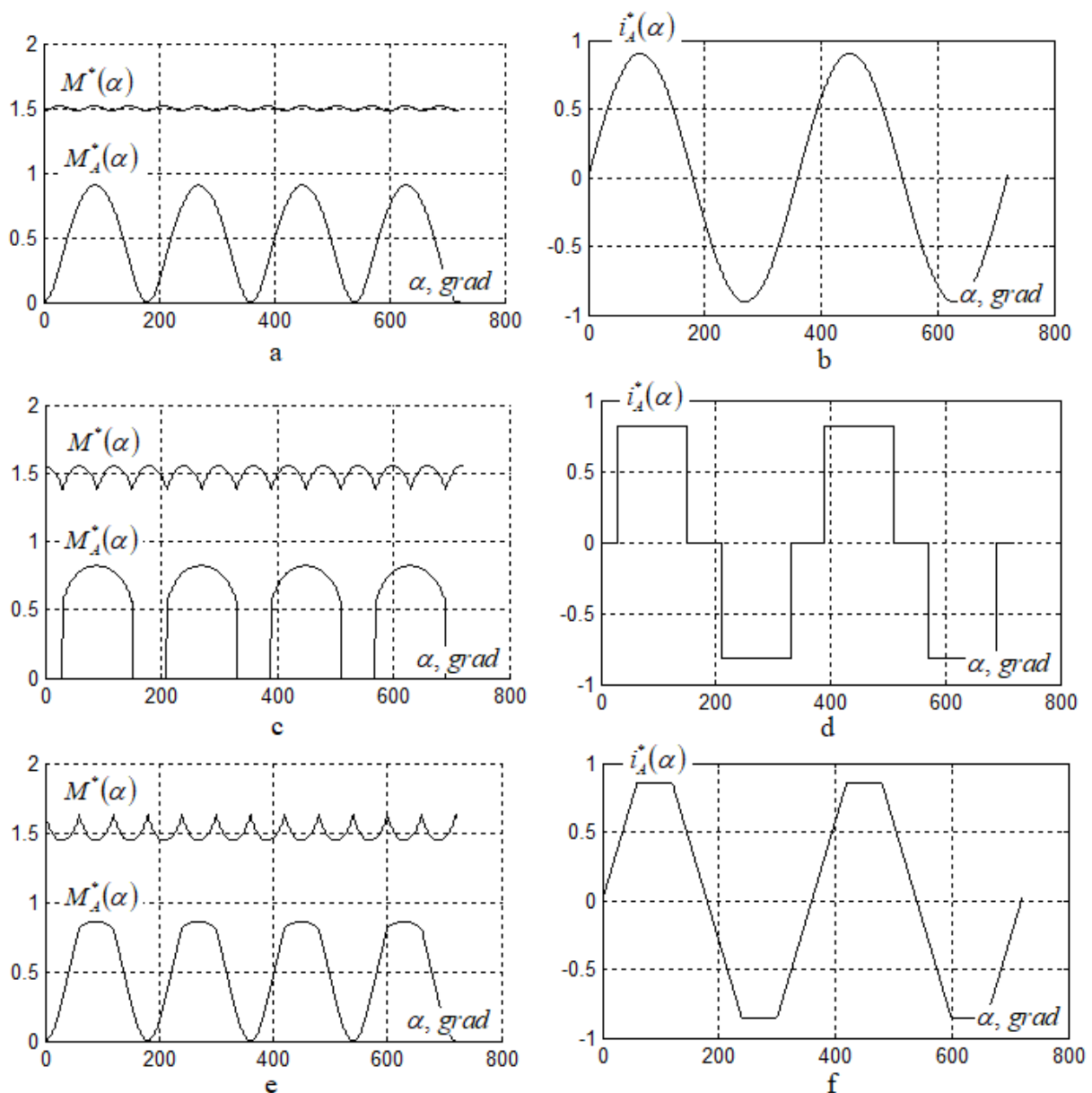


Fig. 11

**Conclusions.** As a result of modeling the brushless magnetoelectric TM with a slotless stator with a surface installation of permanent magnets on the rotor, it was found that for a given configuration of the magnetic system and the length of the magnet, the largest torque per unit of expended power is achieved with the number of pole pairs equal to 7. A further increase in the number of poles does not lead to an increase in the electromagnetic torque, however, in this case, there is a tendency to reduce its ripple, which in some cases can be a decisive factor in choosing an TM. The considered method of reducing the torque ripple by increasing the angular size of the pole made it possible to reduce the ripple factor by 1.5 times and at the same time increase the magnitude of the electromagnetic torque by 11 %, provided that the length of the magnet is constant along the magnetization axis and, respectively, by 1,4 times and by 3,1% subject to the constancy of the volume of the magnetic material. It is shown that a further reduction in the ripple factor can be most effectively implemented by generating such a form of currents in the motor phases, as a result of the interaction of which with the rotating magnetic field of the rotor, the torque characteristic of the motor with a minimum value of the ripple factor will be obtained.

Фінансується за держбюджетною темою «Розробити наукові засади та принципи побудови керованих н-степеневих магнітоелектричних систем з екстремальними характеристиками» (шифр «Екстремум»), що виконується за Постановою Бюро ВФТПЕ 29.05.2018 р., протокол № 9. Державний реєстраційний номер роботи 0119U001279. КПКВК 6541030.

1. Mikerov A.G., Rubtcova E.A Control system torque motors selection according to their energy and dynamic indexes. <https://www.researchgate.net/publication/281372948> (Rus)
2. Antonov A.E., Kireyev V.G. Construction of optimal slotless magnetoelectrical motors. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2003. No 4. Pp. 38–40. (Rus)
3. Kireyev V.G. Construction of the optimal brushless motor of disk type with permanent magnets. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2012. No 6. Pp. 38–43. (Rus)
4. Grebenikov V.V., Pryimak M.V. Study of the influence of the configuration of the magnetic system on the torque characteristics of electric motors with permanent magnets. *Electrical engineering and electrical energy*. Zaporozhye. 2009. No 2. Pp. 57–60. (Rus)
5. Permanent magnets. Handbook / Ed. Yu.M. Pyatina. Moskva: Energiya, 1980. 487 p. (Rus)
6. Gridin V.M. Torque brushless DC motors with discrete and discrete-analog control by rotor position. *Electrichestvo*. 2017. No 4. Pp. 50–55. <https://doi.org/10.24160/0013-5380-2017-4-50-55> (Rus)

## ОСОБЛИВОСТІ РОЗРОБКИ БЕЗПАЗОВИХ БЕЗКОНТАКТНИХ МАГНІТОЕЛЕКТРИЧНИХ МОМЕНТНИХ ДВИГУНІВ

**В.Г. Кірсєв**, канд. техн. наук, **К.П. Акинін**, докт. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна

e-mail: [kvg2016@ukr.net](mailto:kvg2016@ukr.net)

Розглянуто структуру безконтактного магнітоелектричного моментного двигуна з безпазовим статором при поверхневій установці постійних магнітів на роторі. Розроблено модель двигуна для розрахунку його характеристик у середовищі програмного комплексу COMSOL Multiphysics 6.0. Проведено оптимізацію його структури, в результаті якої було визначено оптимальну кількість пар полюсів і таке співвідношення між розмірами елементів електромагнітного ядра двигуна, за якого досягається максимальний електромагнітний момент на одиницю споживаної потужності. Стаття торкається також проблеми досягнення мінімального значення коефіцієнта пульсацій моменту в двигунах подібної конструкції. Запропоновано шляхи її вирішення як завдяки конструктивним змінам магнітної системи, так і через синтез сигналів завдання для формування таких форм струмів у фазах двигуна, у результаті взаємодії яких з обертовим магнітним полем ротора формується моментна характеристика двигуна з мінімальним значенням коефіцієнта пульсацій. Бібл. 6, рис. 11.

**Ключові слова:** безконтактний магнітоелектричний моментний двигун, безпазовий статор, коефіцієнт моменту, коефіцієнт пульсацій.

Надійшла: 18.10.2022

Прийнята: 31.10.2022

Submitted: 18.10.2022

Accepted: 31.10.2022

## ЗАСОБИ ПРОЕКТНОГО СИНТЕЗУ ЗАНУРЕНИХ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ ІННОВАЦІЙНИХ КОНСТРУКЦІЙ

**І.В. Головань**<sup>1\*</sup>, канд. техн. наук, **О.М. Попович**<sup>1\*\*</sup>, докт. техн. наук, **В.О. Поліщук**<sup>2\*\*\*</sup>

<sup>1</sup> – Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна

<sup>2</sup> – Національний технічний університет України «КПІ ім. Ігоря Сікорського»,

пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна

E-mail: [golovan\\_77@ukr.net](mailto:golovan_77@ukr.net); [popovich1955@ukr.net](mailto:popovich1955@ukr.net); [valemp@ukr.net](mailto:valemp@ukr.net)

*Обґрунтовано доцільність у проведенні досліджень у напрямку підвищення енергоефективності занурених асинхронних двигунів завдяки впровадженню комплексу засобів проектного синтезу їхніх інноваційних конструкцій. Розглянуто засоби проектного синтезу занурених асинхронних двигунів інноваційних конструкцій. Їхнє застосування під час реалізації проектування дасть змогу підвищити рівень удосконалення занурених асинхронних двигунів відповідно до вимог для сучасного обладнання в частині надійності, енергоефективності, економичності. Наведено результати реалізації оптимального проектного синтезу асинхронного двигуна зануреного насоса інноваційної конструкції на базі двигуна ПЭДВ 2.8-140 за критерієм максимуму коефіцієнта корисної дії. Бібл. 10, рис. 2, таблиця.*

**Ключові слова:** занурений асинхронний двигун, проектний синтез, енергоефективність.

Застосування традиційних конструктивних схем асинхронних двигунів (АД), технологій виготовлення і проектування забезпечує високу ефективність створення й застосування АД для усереднених експлуатаційних умов. Це досягається завдяки багаторічному досвіду створення АД, корекції розрахункових методик за результатами дослідження натурних зразків АД. Така відпрацьована технологія створення АД ускладнює розробку високоефективних АД спеціалізованого виконання. Особливості застосування АД потребують використання спеціалізованих конструктивних схем і матеріалів, адаптованих до конкретики функціонування машини, а значна вартість створення АД в умовах обмеженого випуску (характерно для АД спеціалізованого виконання) заважає цьому. Прикладами АД за використання спеціалізованих конструктивних схем є АД з масивним ротором як потужних швидкісних машин приводу компресора, турбонасоса, нагнітачів і таке інше [1].

Із появою сучасних технологій, матеріалів та засобів математичного забезпечення проектного синтезу АД, зокрема із застосуванням параметризації польових моделей [2, 3], з'являються нові можливості щодо підвищення їхньої енергоефективності в умовах спеціалізації застосування. Зокрема це стосується занурених асинхронних двигунів насосів.

Під час роботи обладнання занурених насосів основні втрати енергії (у відсотках від спожитої енергії) припадають на втрати в насосі – близько 30 %, у зануреному асинхронному електродвигуні – 13 %, в кабелі – 10 %, близько 9 % енергії втрачається в трансформаторі, станції управління і насосно-компресорних трубах [4]. З огляду на це та задля підвищення енергоефективності видобутку нафти чи підземних вод і зниження втрат активної потужності в струмопровідних елементах електротехнічного комплексу залишається актуальним питання підвищення енергоефективності занурених електродвигунів [5].

Специфіка роботи таких машин пов'язана з умовами їхнього розміщення в трубопроводі обмеженого діаметра, заповнення немагнітного проміжку між статором і ротором рідиною, агресивного впливу цієї рідини на матеріали магнітопроводу й обмоток, вертикальним розміщенням осі обертання ротора та великими навантаженнями на упорний підшипник, живленням АД від довгого кабелю, розміщеного в свердловині. Тому, зважаючи на зазначені особливості роботи, окрім необхідності підвищення енергетичної ефективності, АД свердловинного насоса потребує зниження пускових струмів та механічних втрат на тертя поверхні ротора об воду, збільшення надійності обмотки й підшипника [6].



**Метою цієї роботи** є обґрунтування використання засобів проектного синтезу занурених асинхронних двигунів інноваційних конструкцій задля підвищення їхньої ефективності.

Під час розробки нової конструкції електродвигуна задля підвищення його енергоефективності необхідно прагнути до максимального використання його поперечного перерізу з урахуванням технологічних особливостей виготовлення, експлуатації, енергетичних параметрів і ступеню використання активних матеріалів.

Ротор існуючого зануреного АД у його поперечному перерізі характеризується низькими електромагнітними навантаженнями. Тобто більша частина площі поперечного перерізу ротора, що відноситься до валу, практично не бере участь у процесах електромеханічного перетворення енергії. З метою підвищення ефективності використання матеріалу ротора перейдемо від конструкції ротора з шихтованих листів електротехнічної сталі до конструкції у вигляді суцільного сталевго елемента. Суцільний сталевий ротор-вал забезпечить можливість ефективного використання як електричних, магнітних, так і механічних властивостей матеріалу в усьому його перерізі. Крім того, з'являється можливість зниження пускових струмів.

Враховуючи технологію отримання шихтованих листів магнітопроводу статора й ротора, що полягає у їхньому одночасному штампуванні, відмовитись також і від конструкції з шихтованих листів електротехнічної сталі в магнітопроводі статора. Альтернативою пакета з шихтованих листів електротехнічної сталі може стати конструкція статора з суцільного матеріалу, отриманого за технологією порошкової металургії.

**Розрахунок характеристик АД з безшихтованими магнітопроводами** статора та ротора ускладнюється специфікою процесів у ньому, зокрема, тривимірним розподілом магнітного поля, а саме: краєвими ефектами, витісненням магнітного потоку з магнітопроводу вихровими струмами, нелінійністю параметрів та несинусоїдністю процесів. Найбільш точно таку задачу можна розв'язати методом скінченних елементів (МСЕ) у тривимірній постановці. Але це потребує значних ресурсів обчислювальної техніки і в практиці проектування АД частіше використовується для тестування більш простих моделей. Навіть у разі використання розрахунку магнітного поля методом скінченних елементів у двовимірній постановці задачі безпосереднє визначення параметрів робочого режиму за результатами розв'язання польової задачі потребує великих витрат машинного часу, що пов'язано з великою кількістю ітерацій. Ефективність методів проектування можна суттєво покращити, якщо використовувати точні польові підходи для визначення залежностей зміни інтегральних параметрів АД і застосовувати їх під час розрахунків режимів роботи. У зв'язку з чим, для створення ефективних конструкцій АД з безшихтованими магнітопроводами та дослідження режимів їхньої роботи розроблена математична модель визначення параметрів ротора таких двигунів [2, 3].

Розроблена математична модель визначення параметрів ротора АД з безшихтованими магнітопроводами враховує параметри магнітного поля в роторі по боковій, торцевій поверхнях, у лобових зонах і дає змогу отримати квазітривимірний розв'язок задачі, який враховує особливості складного тривимірного розподілу магнітного поля. Ця модель дозволяє підвищити ефективність проектування таких АД завдяки достатньо точному визначенню параметрів магнітного поля ротора МСЕ і мінімізації кількості польових розрахунків у разі визначення нелінійних залежностей зміни параметрів ротора для подальшого їхнього використання під час розрахунків параметрів експлуатаційних режимів АД коловими методами.

Визначення параметрів АД з безшихтованими магнітопроводами виконується за застосування математичної моделі, в якій всі процеси в роторі, у тому числі й в масивному магнітопроводі з розподіленими вихровими струмами, еквівалентуються процесами в еквівалентних контурах струмів із зосередженими параметрами [2, 3]. Умовами еквівалентування є рівність втрат активної енергії та енергії магнітного поля за однакової величини магнітного потоку взаємної індуктивності статор-ротор та частоти.

Урахування нелінійних властивостей параметрів АД із безшихтованими магнітопроводами здійснено завдяки визначенню їхньої функціональної залежності від незалежних змінних за кожного значення ковзання. Параметри за основним полем є функціями коефіцієнта насичення магнітного поля, що залежить від сумарної МРС машини. Активний опір та

індуктивність розсіювання роторного контура за фіксованого ковзання залежать від роторного струму. Розрахунок параметрів магнітного кола за наявності двох шляхів потоку взаємної індуктивності (торцями та боковою поверхнею) здійснюється за умови їхнього паралельного з'єднання, тобто за однакових значень падіння магнітного потенціалу на цих ділянках. Для визначення параметрів еквівалентних контурів ротора з безшихтованим магнітопроводом під час розв'язання польової задачі в квазітривимірній постановці проводиться узгодження сформованих залежностей параметрів, що отримані без урахування взаємного впливу один на одного процесів в боковій і торцевій поверхнях та лобовій зоні.

**Реалізація оптимізаційного проектного синтезу зануреного асинхронного двигуна з безшихтованим статором і ротором за критерієм максимуму ККД** здійснена з використанням математичної моделі розрахунку параметрів асинхронного двигуна з безшихтованим магнітопроводом. За базову модель зануреного асинхронного двигуна візьмемо асинхронний двигун потужністю  $P_2=2800$  Вт ПЭДВ 2.8-140. Геометричні параметри магнітопроводу статора та обмоточні дані АД, що підлягають оптимізації, залишаються незмінними [7]. Коефіцієнт заповнення міддю паза серійної машини  $k_{3,п.} = 0.1536$ .

Конструкція ротора являє собою суцільний сталевий масив з пропилами та мідними короткозамикаючими кільцями в лобових його частинах. Ротор виконаний з конструкційної сталі з електричною провідністю  $\gamma=5e6$  Ом/м. Електромагнітні параметри ділянки короткозамикаючого кільця становлять активний опір  $r_k=4.2e^{-7}$  Ом, індуктивність розсіювання  $L_k=8.8e^{-9}$  Гн.

За параметри оптимізації прийняті параметри масивного феромагнітного ротора, а саме глибина  $0.02\text{ м} \leq h_z \leq 0.034\text{ м}$  та ширина  $0.0005\text{ м} \leq b_z \leq 0.0012\text{ м}$  прорізів. Кількість прорізів  $z$  не змінна і прийнята на рівні 42 од.

До умов оптимізації відноситься величина допустимих за нагрівом обмотки втрат, що відповідає гріючим втратам серійної машини  $P_{гр} = 690$  Вт. До гріючих обмотку втрат були віднесені всі, за винятком механічних втрат в машині: в магнітопроводі та обмотці статора; в сталі ротора (яка є як магнітопроводом, так і струмопроводом); від вищих гармонік магнітного поля.

На відміну від серійної машини структура магнітопроводу статора, оптимізованого за критерієм максимуму ККД двигуна, характеризується закритими пазами та відсутністю ізолюючої труби на її внутрішній поверхні. Матеріал магнітопроводу статора – суцільний магнітом'який композит Somaloy 130i 5p [8] з електричним опором  $20000\text{ }\mu\Omega\text{м}$  та магнітною характеристикою на рис. 1.

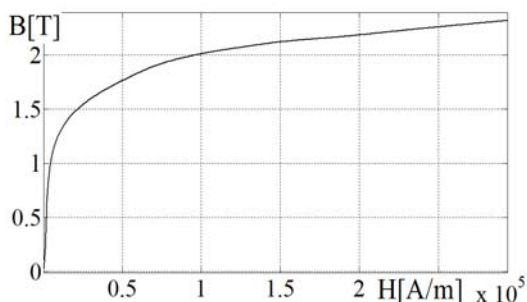


Рис. 1

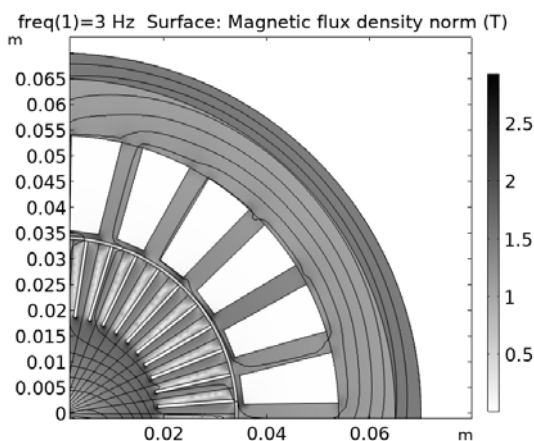


Рис. 2

З метою визначення величини додаткових втрат за вищими гармоніками поля проводилась, за зміни кутової швидкості ротора  $\omega_r$ , та модуля комплексу струму статора  $|\dot{I}_s|$ , серія розрахунків електромагнітного нестационарного поля в 2D-постановці розрахункової області АД [9]. Практичну відсутність додаткових втрат за вищими гармоніками поля можна пов'язати з наявністю достатньо великого повітряного проміжку й містка закриття пазу.

За результатами проведеного пошуку екстремуму, реалізованого на основі методу градієнтного спуску за алгоритмом послідовного квадратичного програмування, було отримано оптимальну за критерієм максимуму ККД асинхронного двигуна конструкцію ротора з параметрами  $h_z=0.03$  м та  $b_z=0.00062$  м.

На рис. 2 наведено конструкцію двигуна, оптимізованого за критерієм максимуму ККД, з розпо-

ділом магнітного поля в його поперечному перерізі, яка отримана за результатами проектного синтезу в комп'ютерному середовищі програм Matlab/Simulink [10] та Comsol Multiphysics.

У таблиці наведено режимні параметри як серійного двигуна ПЕДВ 2.8-140, так і оптимізованого за критерієм максимуму ККД асинхронного двигуна інноваційної конструкції. За проведенням оптимізаційним проектним синтезом на базі двигуна ПЕДВ 2.8-140 було спроектовано машину з ана-

| Режимні параметри                            | Серійний двигун | Оптимізований за критерієм максимуму ККД |
|----------------------------------------------|-----------------|------------------------------------------|
| Робочий момент на валу (Nm)                  | 10.3            | 10.3                                     |
| ККД (%)                                      | 74.5            | 74.4                                     |
| Cos $\phi$                                   | 0.81            | 0.72                                     |
| Струм робочого режиму (A)                    | 7.0             | 7.9                                      |
| Струм пускового режиму (A)                   | 41              | 32                                       |
| Пусковий момент на валу (Nm)                 | 28              | 22                                       |
| Гріючі втрати (W)                            | 690             | 690                                      |
| Механічні втрати (W)                         | 267             | 252                                      |
| Втрати в сталі (W)                           | 180             | 90                                       |
| Додаткові втрати від вищих гармонік поля (W) | 19              | $\approx 0$                              |
| Втрати в обмотці статора (W)                 | 328             | 415                                      |

логічним серійній машині ККД – 74.5 %. Можна бачити, що найбільшого зниження втрат в оптимізованій машині було досягнуто в частині втрат у сталі. Зменшення втрат у сталі статора стало наслідком застосування магнітно-м'якого композиту з високим електричним опором. Через збільшення струму обмотки статора втрати в ній відповідно теж зросли (таблиця).

Завдяки характерним особливостям, які притаманні АД з масивним феромагнітним ротором, отримуємо зменшення пускового струму, величина якого має особливе значення через велику довжину живильного кабелю.

Слід зауважити, що отримана конструкція АД є оптимальною за критерієм максимального значення ККД за умови варіювання тільки двох параметрів оптимізації:  $h_z$  та  $b_z$ . Очевидно, що для отримання повноцінної оптимальної конструкції, що передбачатиме проведення оптимізаційного проектного синтезу вже за багатьма параметрами оптимізації, постає задача подальшого удосконалення розроблених математичних засобів проектного синтезу.

**Висновки.** На наведеному в роботі прикладі проектного синтезу зануреного асинхронного двигуна з безшихтованими магнітопроводами обґрунтовано доцільність застосування розроблених засобів проектного синтезу асинхронних двигунів інноваційних конструкцій для підвищення їхньої енергоефективності. Завдяки поєднанню під час реалізації проектування спеціалізованої конструктивної схеми виконання ротора, досягнень в області сучасних технологій та матеріалів, а саме використання суцільного магнітопроводу з магнітно-м'якого композиту Somaloy 130i 5p, виготовленого за технологією порошкової металургії, розроблених математичних засобів проектування зі створенням параметризованих польових математичних моделей асинхронних двигунів вдалося спроектувати занурений асинхронний двигун на базі ПЕДВ 2.8-140 з суттєвим покращенням його пускових властивостей і з ККД робочого режиму на рівні базового АД.

Роботу виконано за держбюджетною темою “Наукові засади та засоби комплексного проектного синтезу асинхронних машин енергоефективних і ресурсозберігаючих електромеханічних систем” (шифр «АСЕЛМА-К»). Державний реєстраційний номер 0117U00771., КПКВК 6541030.

1. Pyrhonen J., Nerg J., Kurrnen P. and Lauber U. High-Speed High-Output Solid-Rotor Induction-Motor Technology for Gas Compression. in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. Jan. 2010. Vol. 57. No 1. Pp. 272–280. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2009.2021595>
2. Попович О.М., Головань І.В. Уточнення аналізу режимів роботи асинхронних двигунів у складі електромеханотронних систем еквівалентуванням їх польових моделей коловими. *Техн. електродинаміка*. 2014. № 5. С. 113–115.
3. Golovan I.V. The parametrization method of generalized induction motor using the field analysis for design. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2019. No 5. Pp. 49–53. DOI: <https://doi.org/10.15407/techne2019.05.049>
4. Мартюшев Д.Н. Комплексный подход к энергоэффективности при добыче нефти УЭЦН. *Инженерная практика*. 2011. № 6. С. 72–77.

5. Bafghi B., Vahedi A. A Comparison of Electric Motors for Electrical Submersible Pumps Used in the Oil and Gas Industry. Proc. 2nd International Conference on Engineering Sciences. 2nd International Conference on Engineering Sciences. Kerbala, Iraq, March 26-27, 2018. Vol. 433. Pp. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/433/1/012091>.
6. Optimised water solutions. Pumps and systems for water supply and wastewater challenges. URL: <https://api.grundfos.com/literature/Grundfosliterature-6400718.pdf> (accessed: 15.05.2022).
7. Счастливый Г.Г., Семак В.Г., Федоренко Г.Г. Погружные асинхронные электродвигатели. М.: Энергоатомиздат, 1983. 168 с.
8. Somaloy, powders for electromagnetic applications. URL: <https://www.hoganas.com/en/powder-technologies/soft-magnetic-composites/products/coated-powders-for-electromagnetic-applications/> (accessed: 15.05.2022).
9. Головань І.В. Визначення втрат, обумовлених вищими гармоніками електромагнітного поля в асинхронному двигуні. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2016. Вип. 44. С. 82–88.
10. Ramin S.E. Numerical Methods for Engineers and Scientists Using MATLAB. Taylor&Francis Group, 2017. 471 p.

## THE DESIGN SYNTHESIS TOOLS OF SUBMERSIBLE INDUCTION MOTORS OF INNOVATIVE CONSTRUCTURES

I.V. Golovan<sup>1</sup>, O.M. Popovych<sup>1</sup>, V.O. Polishchuk<sup>2</sup>

<sup>1</sup> – Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine, pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine

<sup>2</sup> – Institute of Energy Saving and Energy Management NTUU “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, pr. Peremohy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine

E-mail: [golovan\\_77@ukr.net](mailto:golovan_77@ukr.net), [popovich1955@ukr.net](mailto:popovich1955@ukr.net), [valemp@ukr.net](mailto:valemp@ukr.net)

*The expediency of conducting research in the direction of improving the energy efficiency of submersible induction motors due to the introduction of a set of tools for the design synthesis of their innovative designs was reasoned. Means of design synthesis of submersible induction motors of innovative designs are considered. The combination of which in the implementation of the design will allow to increase the level of improvement of submersible induction motors in accordance with the requirements for modern equipment, such as: reliability, energy efficiency, economy. The results of realization of the induction motor optimal design synthesis of the submersible pump of an innovative design on the basis of the ПЭДВ 2.8-140 motor by criterion of a maximum efficiency are resulted. Ref. 10, fig. 2, table.*

**Key words:** submersible induction motor, design synthesis, energy efficiency.

1. Pyrhonen J., Nerg J., Kurrnen P. and Lauber U. High-Speed High-Output Solid-Rotor Induction-Motor Technology for Gas Compression. in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. Jan. 2010. Vol. 57. No 1. Pp. 272–280. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2009.202159>
2. Popovich O.M. Golovan I.V. Refinement of analysis operation of induction motors as part electromechanical systems using equivalent field models using electrical circuits. *Tekhnichna elektodynamika*. 2014. No 5. Pp. 113–115. (Ukr)
3. Golovan I.V. The parametrization method of generalized induction motor using the field analysis for design. *Tekhnichna elektodynamika*. 2019. No 5. Pp. 49–53. DOI: <https://doi.org/10.15407/techmed2019.05.049>
4. Martyushev D.N. An integrated approach to energy efficiency in oil production IECР. *Inzhenernaia praktika*. 2011. No 6. Pp. 72–77. (Rus)
5. Bafghi B., Vahedi A. A Comparison of Electric Motors for Electrical Submersible Pumps Used in the Oil and Gas Industry. Proc. 2nd International Conference on Engineering Sciences. Kerbala, Iraq, March 26-27, 2018. Vol. 433. Pp. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/433/1/012091>.
6. Optimised water solutions. Pumps and systems for water supply and wastewater challenges. URL: <https://api.grundfos.com/literature/Grundfosliterature-6400718.pdf> (accessed: 15.05.2022).
7. Schastlivyy G.G., Semak V.G., Fedorenko G.G. Submersible induction motors. Moskva: Energoatomizdat, 1983. 168 p. (Rus)
8. Somaloy, powders for electromagnetic applications. URL: <https://www.hoganas.com/en/powder-technologies/soft-magnetic-composites/products/coated-powders-for-electromagnetic-applications/> (accessed: 15.05.2022).
9. Golovan I.V. Determination of losses after ultraharmonic electromagnetic field in the induction motor. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy*. 2016. V. 44. Pp. 82–88.
10. Ramin S.E. Numerical Methods for Engineers and Scientists Using MATLAB. Taylor&Francis Group, 2017. 471 p.

Надійшла: 15.09.2022

Прийнята: 28.09.2022

Submitted: 15.09.2022

Accepted: 28.09.2022

УДК 621.313.322

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2022.63.045>

## РОЗРАХУНКОВА ОЦІНКА ВІБРОПЕРЕМІЩЕНЬ І МЕХАНІЧНИХ НАПРУЖЕНЬ ІЗОЛЯЦІЇ ЛОБОВОЇ ЧАСТИНИ ОБМОТКИ СТАТОРА ПОТУЖНОГО ТУРБОГЕНЕРАТОРА

**К.А. Кучинський\***, докт. техн. наук, **В.А. Крамарський**, канд. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна

e-mail: [kuchynskyy1962@gmail.com](mailto:kuchynskyy1962@gmail.com), [kramarskijv@gmail.com](mailto:kramarskijv@gmail.com)

*Представлено результати чисельних досліджень розподілу вібропереміщень і механічних напружень в ізоляції лобової частини обмотки статора потужного турбогенератора під дією електродинамічних зусиль за різного конструктивного виконання пазового кріплення стержнів обмотки в кінцевій зоні осердя статора машини. Моделювання механічних процесів здійснено за допомогою чисельного методу скінченних елементів (МСЕ) у двовірній постановці. Розглянуто можливість вдосконалення конструкції з метою зменшення амплітуди коливань лобових частин обмотки статора. Бібл. 16, рис. 7.*

**Ключові слова:** турбогенератор, осердя статора, торцева зона, стержень обмотки, ізоляція, метод скінченних елементів, вібропереміщення, механічні напруження.

**Вступ.** Аналіз роботи ряду постачальників електроенергії страховими компаніями протягом останніх 15 років показав [1], що вібрація лобової частини обмотки статора (ОС) стала найважливішою причиною відмови турбогенераторів (ТГ). Масштаби ремонту, збитки, що виникають, та втрати виробництва електроенергії виявляються дуже дорогими.

Однією з найчастіших причин відмов ТГ у процесі експлуатації на атомних електростанціях було порушення цілісності кріплення лобових частин ОС, що пов'язано з несприятливими вібродинамічними характеристиками вузла «колектор дистилляту–патрубки–зовнішні трубопроводи» конструкції [2]. Вібрація лобової частини обмотки призводить до виходу її з ладу через стирання ізоляції або втому міді, розтріскування, внаслідок чого в зоні лобових досить часто під час експлуатації генераторів потужністю 1000 МВт відбувається електричний пробій на землю. Із загальної кількості всіх відмов відносний внесок такого виду пошкоджень становив 45,5 % (за діаграмою Парето [3, 4]). Сучасне кріплення повинно забезпечити мінімально можливий рівень коливання обмотки відносно осердя, щоб зменшити кількість таких пошкоджень.

Лобові частини обмоток електричних машин сконструйовані таким чином, що за нормальних обставин їхні механічні навантаження контролюються достатньо надійно, щоб запобігти ушкодженням. Проте, лобові частини можуть бути пошкоджені внаслідок [5]:

- ослаблення кріплення лобових частин і сполучної структури через механічне старіння й теплове розширення;
- невдалої конструкції кріплення лобових частин в умовах близьких до резонансу до первинних механічних сил частоти обертання та подвійної частоти мережі (100/120 Гц);
- аномальних умов експлуатації (несиметрія, коротке замикання тощо);
- відносного переміщення одного компонента щодо іншого, що може викликати стирання високовольтної ізоляції обмотки.

Вібрація лобових частин обмотки може призвести до розтріскування ізоляції стержня обмотки поблизу виходу з паза статора, а у важких випадках – до втомного розтріскування мідних провідників, що викликає значні дугові струми. Зрештою, будь-яка з цих проблем може призвести до замикання ОС на землю. За даними експериментальних досліджень потужних ТГ встановлено, що в разі недостатнього відпрацювання конструкції системи кріплення ОС її вібропереміщення в нормальних експлуатаційних режимах здатні досягти неприпустимо великих величин [6].



Роботи з дослідження рівня вібрації елементів конструкції в торцевій зоні статора ТГ проводяться провідними виробниками протягом десятиліть і тривають донині.

Відомі ймовірнісні методи дослідження вібраційних сигналів у задачах вібродіагностики вузлів електричних машин [7].

Порівняльне дослідження електромагнітної сили й механічної реакції обмотки до й після типових електромеханічних несправностей ТГ [8] дало змогу отримати аналітичний вираз для розрахунку сили, що діє на лобову частину за одночасного порушення статичного ексцентриситету й міжвиткового замикання в роторі. Вплив міжвиткового короткого замикання в статорній обмотці на рівень вібрації її лобової частини досліджено в роботах [9, 10].

Однак, результати розрахунків досі не забезпечують необхідної для інженерної практики точності. Одна з основних причин такого стану полягає в недостатній надійності інформації щодо механічних параметрів обмотки й значною мірою в невизначеності пружних властивостей конструкції кріплення. Відповідні величини є вхідними даними для розрахунків, що в кінцевому підсумку визначає недостатню точність результатів.

Ситуація дефіциту інформації щодо вхідних даних для розрахунку коливань обмотки призводить до того, що в дослідженнях вібрації переважають експериментальні роботи.

Висока вартість модельних експериментів змушує проводити дослідження на натурних ТГ, а відпрацювання конструкцій кріплення проводити за результатами цих досліджень.

Нині всі потужні ТГ проходять вібраційний контроль на стендах підприємств-виробників і періодичний контроль – в перші роки експлуатації. Багаторічний досвід досліджень дав змогу виділити загальні для різних типів ТГ особливості вібрацій лобових частин ОС. Величини віброзміщень залежать від електродинамічних зусиль, що визначаються не тільки струмом у стержні, але й іншими параметрами обмотки. Використання недостатньо жорстких систем кріплення на генераторах великої потужності призводить до виникнення неприпустимого рівня вібрацій.

Проблема надійного закріплення статорної обмотки становить одну з основних труднощів конструювання потужних ТГ.

Великий обсяг розрахункових і експериментальних досліджень, які були виконані в минулі роки, все ж не дав змогу повністю вирішити завдання прогнозування рівня вібрації лобових частин ОС і є одним з найважливіших завдань проектування потужного ТГ. Це насправді легко пояснити, якщо розглянути безліч ідеалізацій у найбільш докладних розрахункових методиках. Необхідність ідеалізації розрахункової схеми пов'язана як із складністю геометрії лобових частин, характерами їхніх зв'язків між собою й опорними конструкціями, так і з особливостями технології, матеріалами, які застосовуються, недостовірністю багатьох вхідних даних. Навіть багатоваріантний підхід до теоретичної оцінки вібраційного стану за допомогою алгоритмів масових розрахунків коливань лобових частин дає занадто широкий діапазон прогнозованих величин, що вимагає водночас значного обсягу підготовчої та обчислювальної роботи.

**Метою роботи** є дослідження розподілу переміщень та напружень по довжині лобової частини обмотки статора турбогенератора, яка знаходиться під дією електродинамічних зусиль, та можливості поліпшення механічних характеристик шляхом вдосконалення конструкції закріплення стержнів обмотки на виході з пазу.

**Аналіз результатів чисельних досліджень.** Проаналізовано результати досліджень розподілу вібропереміщень і механічних напружень в ізоляції лобової частини ОС ТГ потужністю 1000 МВт під дією електродинамічних зусиль за різного конструктивного виконання пазового кріплення стержня в кінцевій зоні генератора. Моделювання механічних процесів здійснюється за допомогою чисельного методу скінченних елементів (МСЕ) у двомірній постановці.

Вирішення задачі пружності твердого тіла на основі МСЕ еквівалентне у варіаційній постановці мінімізації потенційної енергії системи, що виражена через поле переміщень. У процесі мінімізації потенційної енергії пружного тіла в польовій математичній моделі утворюються інтеграли, які входять у рівняння для елементів [11]. Матриця жорсткості елемента:

$$[k] = \int_V [B]^T [D] [B] dV. \quad (1)$$

Вектор навантаження елемента:

$$\{f\} = - \int_V [N]^T \begin{Bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{Bmatrix} dV - \int_V [B]^T [D] \{\epsilon_0\} dV - \int_S [N]^T \begin{Bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{Bmatrix} dS - \{P\}, \quad (2)$$

де  $[B]$  – матриця градієнтів;  $[D]$  – матриця пружних констант;  $\{\epsilon_0\}$  – початкова деформація елемента;  $[N]$  – матриця функцій форми;  $X, Y, Z$  – об’ємні сили;  $P_x, P_y, P_z$  – поверхневі навантаження;  $\{P\}$  – вектор вузлових сил;  $S$  – площа елемента;  $V$  – його об’єм.

Для трикутного елемента з координатами вершин  $i, j, m$  у декартовій системі координат, товщиною  $t$ , модулем пружності  $E$ , коефіцієнтами теплового розширення  $\alpha$  і Пуассона  $\mu$ , відхиленням його температури від рівноважного значення  $\Delta T$  матриця градієнтів має вигляд:

$$[B] = \frac{1}{2S} \begin{bmatrix} b_i & 0 & b_j & 0 & b_m & 0 \\ 0 & c_i & 0 & c_j & 0 & c_m \\ c_i & b_i & c_j & b_j & c_m & b_m \end{bmatrix}, \quad (3)$$

де коефіцієнти  $b_i, b_j, b_m, c_i, c_j, c_m$  пов’язані з координатами вузлів елемента.

Матриця пружних констант:

$$[D] = \frac{E}{1-\mu^2} \begin{bmatrix} 1 & \mu & 0 \\ \mu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\mu}{2} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Тоді

$$[k] = [B]^T [D] [B] t S, \quad (5)$$

$$\{f\} = [B]^T [D] \{\epsilon_0\} t S = \frac{\alpha E t \Delta T}{2(1-\mu)} \begin{Bmatrix} b_i \\ c_i \\ b_j \\ c_j \\ b_m \\ c_m \end{Bmatrix}. \quad (6)$$

Система рівнянь елемента для розрахунку невідомих переміщень  $U$  у вузлах:

$$[k] \begin{Bmatrix} U_{2i-1} \\ U_{2i} \\ U_{2j-1} \\ U_{2j} \\ U_{2m-1} \\ U_{2m} \end{Bmatrix} = \{f\}, \quad (7)$$

де змінні  $U$  з індексами «2» (тобто у двовимірній постановці задачі) відповідають величинам переміщень вздовж осі  $y$ , а з індексами «2-1» – вздовж осі  $x$ .

Відомо, що найбільші вібрації обмотки відзначаються в радіальному напрямку; тангенціальні переважно в 1,5...2 раза нижче. Водночас максимальні питомі електродинамічні зу-

силля діють на лобову дугу в радіальному напрямку й для ТГ потужністю від 800 до 1200 МВт становлять відповідно від 19,4 до 16,8 Н/см [12].

Розрахункова оцінка вібропереміщень і механічних напружень в елементах ізоляції лобової частини стержня проводилася для статорної обмотки ТГ потужністю 1000 МВт, що знаходиться під впливом радіальних електродинамічних зусиль у номінальному режимі.

На рис. 1, 2 відображено розподіли механічних характеристик ізоляції за довжиною стержня на виході з паза осердя за звичайних способів кріплення пазової частини обмотки в зоні крайніх пакетів ТГ (відповідно амплітуди вібропереміщень вузлів ізоляції та напруження в її елементах: 1 – аксіальні (вздовж осі  $x$  моделі); 2 – радіальні (вздовж осі  $y$ ); на наступних рисунках позначення кривих відповідають указаним). Водночас величини аксіальних вібропереміщень в області головок лобових частин складають -0,112 мм, а максимальних радіальних – 0,258 мм; локальні максимальні механічні напруження (в торцевій зоні генератора) досягають значень 2,300 МПа і 3,262 МПа відповідно.

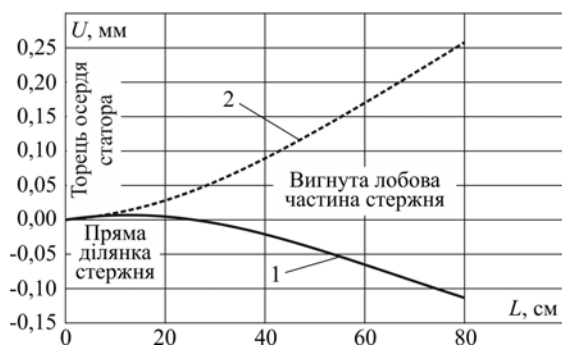


Рис. 1

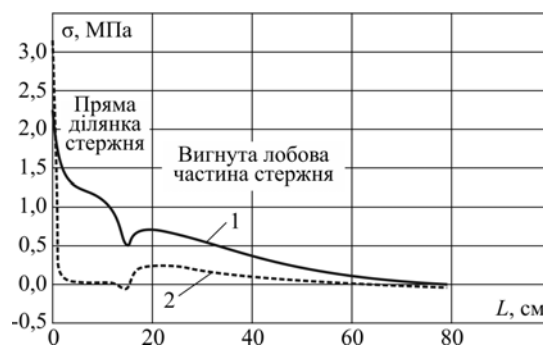


Рис. 2

Відомі варіанти виконання торцевої зони статора з «вивільненням» стержня обмотки в області крайніх пакетів осердя на певну глибину [13, 14]. Результати чисельного аналізу впливу незакріпленого в пазовій частині «відрізка» 0,2 м статорної обмотки ТГ на вібромеханічний стан її лобової частини показано на рис. 3, 4.

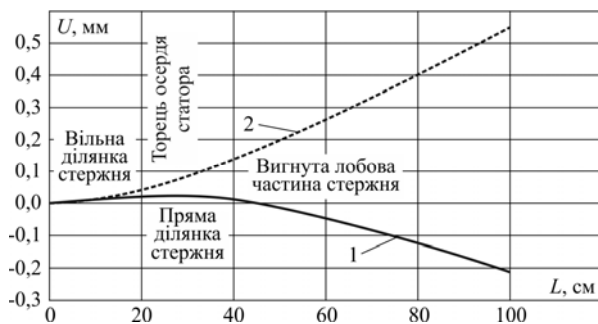


Рис. 3

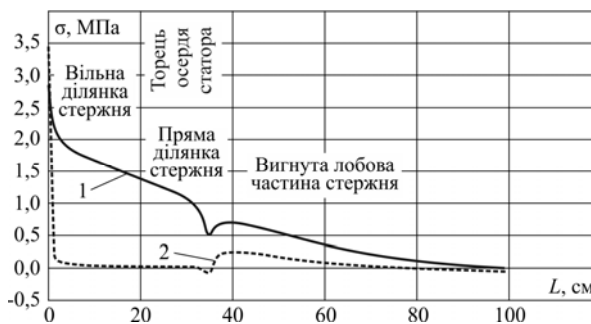


Рис. 4

За такого конструктивного закріплення пазової частини стержня порівняно зі звичайним варіантом суттєво підвищуються величини максимальних аксіальних і радіальних переміщень лобових частин (відповідно -0,211 і 0,554 мм). Також збільшуються й максимальні значення механічних напружень (до 2,895 і 3,470 МПа).

Переміщення стержнів на виході з паза сприяють ослабленню вузлів кріплення ОС, що призводить до підвищення вібрації стержнів і, зі свого боку, до прискорення пошкодження деталей кріплення [15].

Поліпшення вібромеханічних характеристик стержневої обмотки може бути досягнуто завдяки застосуванню технічного рішення [16], яке спрямоване на фіксацію крайніх клинів у пазах осердя, а також задля уникнення можливості ослаблення їхнього кріплення й випадіння (рис. 5).

Сутність удосконаленої конструкції полягає в тому, що вона дає змогу зменшити довжину консольної частини стержнів обмотки на виході з осердя й у такий спосіб зменшити амплітуду її коливань.

На рис. 5 поперечного розрізу осердя й ОС генератора позначено: 4 – натискні пальці; 7 – просічки в пальцях; 8 – дистанційні вставки; 10 – вирізи в зубцях осердя; 11 – вирізи в пальцях 4 в зоні клинів, співвісні з вирізами 12 в стінках пазів, у яких розташовані подовжені клини 13; 14 – стопорні планки до пальців 4 з болтовим з'єднанням 15; 19 – шпильки між пальцями; 20 – гвинти для кріплення шпильок до пальців.

Удосконалені натискні пальці подовжені по радіусу до внутрішнього діаметру статора і в зоні кінцевих клинів обмотки виконані за типом «чобітків» із трикутними вирізами в стінках на одній осі з вирізами в пазах осердя, а кінцеві клини збільшені за довжиною і шириною з боку «чобітків» і забезпечені додатковими трикутними виступами.

Позитивні зміни вібраційних показників лобової частини обмотки ілюструють рис. 6, 7.

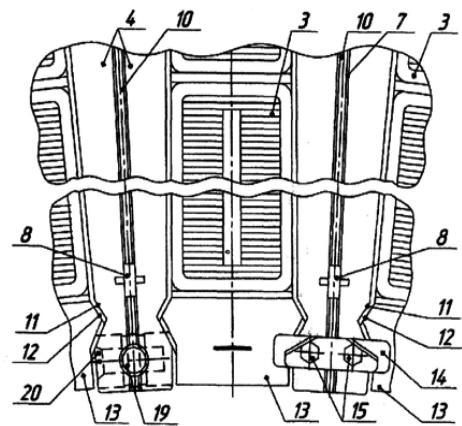


Рис. 5

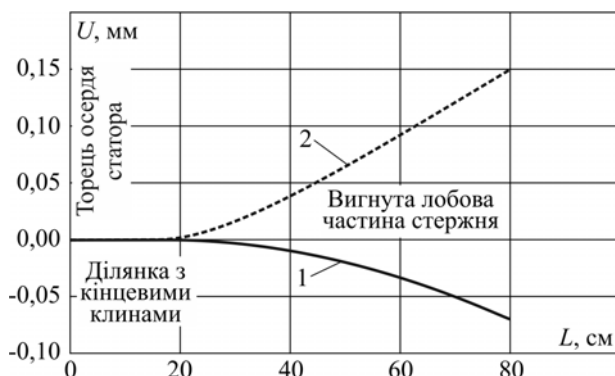


Рис. 6

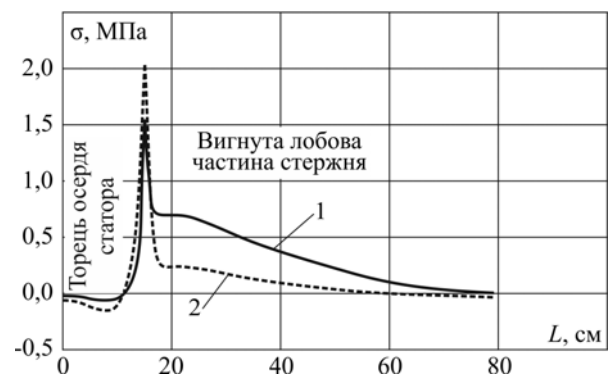


Рис. 7

Результати розрахунків показали практично дворазове (до -0,068 і 0,152 мм) зменшення відповідно максимальних аксіальних і радіальних переміщень вузлів ізоляції, що досягається завдяки удосконаленню конструкції кріплення пазової частини стержня порівняно з традиційною. Локальні максимальні значення механічних напружень знижуються в такому випадку приблизно в 1,5 рази (1,543 і 2,048 МПа).

### Висновки.

1. Розроблено польові математичні моделі, комплексну методику та програмне забезпечення для чисельних досліджень механічних характеристик елементів обмотки статора потужних турбогенераторів.

2. Проаналізовано вплив різного конструктивного виконання кріплення пазової частини обмотки статора на вібраційний стан її лобової частини.

3. Показано, що представлене вдосконалення конструкції кріплення пазової частини стержня обмотки на виході з осердя дає змогу досягти майже дворазового зменшення аксіальних і радіальних переміщень вузлів ізоляції в лобовій частині обмотки статора й 50-відсоткового – механічних напружень в ній на виході з пазу осердя.

Роботу виконано за держбюджетною темою «Наукове обґрунтування та розробка методів і засобів підвищення безвідмовності потужного генеруючого обладнання ТЕС, ГЕС і АЕС» (шифр «БЕЗВІДМОВНІСТЬ-2»), що виконується за Постановою Бюро ВФТПЕ від 29.05.2018 р., протокол № 9, Державний реєстраційний номер роботи 0119U001213. КПКВК 6541030.

1. Letal J., Satmoko B., Manik N., Stone G. Stator End-Winding Vibration in Two-Pole Machines. *IEEE Industry Application Magazine*. November/December 2020. Pp. 23.
2. Горбатина Л.П., Жуков Д.В., Кади-Оглы И.А. Двухполюсные и четырехполюсные турбогенераторы мощностью 1000 МВт для АЭС. Описание конструкции, опыт эксплуатации и пути совершенствования. *Электросила*. 2003. № 42. С. 16–21.
3. Шидловський А.К., Титко О.І., Федоренко Г.М. Електродинамічна стійкість з'єднувальних та вивідних шин обмотки статора та методи підвищення надійності турбогенераторів потужністю 1000 МВт. *Енергетика та Електрифікація*. 2008. № 9. С. 22–27.
4. Федоренко Г.М., Остапчук Л.Б., Дубік Г.О. Безпека, надійність потужних генераторів та шляхи їх підвищення. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2011. Вип. 30. С. 39–43.
5. Система непрерывного он-лайн мониторинга вибрации лобовых частей обмотки статора генераторов и электродвигателей *Iris Power EVTracII* / ООО «ДиАйрис». URL: <http://diiris.com/oborudovanie/diagnostika-statora/monitoring-lobovyih-chastey-obmotki-nepretyvnyiy-monitoring-vibratsii-lobovyih-chastey-obmotki-statora/> (дата звернення: 08.09.2021)
6. Жимолюхов О.М. Вибрация и надежность обмоток статоров турбогенераторов в стационарных режимах. URL: <https://www.dissercat.com/content/vibratsiya-i-nadezhnost-obmotok-statorov-turbogeneratorov-v-statsionarnykh-rezhimakh> (дата звернення: 08.09.2021)
7. Гижко Ю.И., Зварич В.Н., Мыслович М.В., Сысак Р.М., Тукало И.И. Перспективы модернизации систем виброконтроля и вибродиагностики оборудования электростанций на примере Трипольской ТЭС. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2012. Вип. 33. С. 53–61.
8. Yuling He. Electromagnetic Force and Mechanical Response of Turbo-Generator End Winding under Electro-mechanical Faults. *Mathematical Problems in Engineering*. December 2021. Vol. 1. Pp. 1–19.
9. He Y., Gerada D., Ming X.X. Impact of stator inter-turn-short-circuit position on end winding vibration in synchronous generators. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2020. Vol. 36. No. 2. Pp. 22–27.
10. Meng Q., He Y. Mechanical response before and after rotor inter-turn short-circuit fault on stator windings in synchronous generator. Proc. of the 2018 *IEEE Student Conference on Electric Machines and Systems*. HuZhou, China, December 2018. Pp. 1–7.
11. Кучинский К.А. Влияние нарушения циркуляции дистиллята на термомеханические напряжения в изоляции обмотки статора турбогенератора мощностью 800 МВт. *Технічна електродинаміка*. 2014. № 1. С. 75–80.
12. Глебов И.А., Данилевич Я.Б. Научные основы проектирования турбогенераторов. Л.: Наука, 1986. 184 с.
13. Голоднова О.С., Ростик Г.В. Анализ и мероприятия по предупреждению повреждений сердечников статоров турбогенераторов. *Электросила*. 2004. № 43. С. 56–64.
14. Кучинський К.А. Вплив ступеня закріплення обмотки в торці паза статора турбогенератора на термомеханічні характеристики ізоляції її стержня. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2022. Вип. 61. С. 31–36. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2022.61.031>
15. Виговський О.В. Аналіз, прогнозування та управління термомеханічними дефектами в системах водяного охолодження обмоток статорів потужних турбогенераторів АЕС. *Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля*. 2015. Вип. 24. С. 20–26.
16. Крамарський В.А., Черемісов І.Я., Грубой О.П., Титко О.І., Пенський В.Ф., Мінко О.М. Статор електричної машини. Патент України № 99571, 2015.

## CALCULATED ASSESSMENT OF VIBRATION MOVEMENTS AND MECHANICAL STRESSES OF INSULATION FRONT PART OF THE STATOR WINDING OF THE POWERFUL TURBOGENERATOR

**K.A. Kuchynskyi, V.A. Kramarsky**

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,  
pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine  
e-mail: [kuchynskyy1962@gmail.com](mailto:kuchynskyy1962@gmail.com), [kramarskijv@gmail.com](mailto:kramarskijv@gmail.com)

*Presented are the results of numerical studies of the distribution of vibration displacements and mechanical stresses in the insulation of the frontal part of the stator winding of a powerful turbogenerator under the influence of electro-dynamics forces for different constructive solutions of the groove fastening of the winding rods in the end zone of the generator stator core. Modeling of mechanical processes is carried out using the finite element numerical method (FEM) in a two-dimensional setting. The possibility of improving the design with the aim of reducing the amplitude of oscillations of the front parts of the stator winding was considered. Ref. 16, fig. 7.*

**Keywords:** turbogenerator, stator core, end zone, winding rod, isolation, finite element method, vibration movements, mechanical stresses.

1. Letal J., Satmoko B., Manik N., Stone G. Stator End-Winding Vibration in Two-Pole Machines. *IEEE Industry Application Magazine*. November/December 2020. Pp. 23. DOI: <https://doi.org/10.1109/MIAS.2020.2982725>
2. Gorbatina L.P., Zhukov D.V., Kadi-Ogly I.A. Two-pole and four-pole turbogenerators capacity of 1000 MW for nuclear power plants. Description of the design, operating experience and ways to improve. *Elektrosila*. 2003. No 42. Pp. 16–21. (Rus)
3. Shidlovsky A.K., Tytko O.I., Fedorenko H.M. Electrodynamic stability of connecting and output buses stator windings and methods for improving the reliability of 1000 MW turbine generators. *Energetika ta Elektrifikaziia*. 2008. No 9. Pp. 22–27. (Ukr)
4. Fedorenko H.M., Ostapchuk L.B., Dubik G.O. Safety, reliability of powerful generators and their ways increase. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2011. No 30. Pp. 39–43. (Ukr)
5. System for continuous online monitoring of vibration of the end parts of the stator winding of generators and electric motors Iris Power EVTracII / ООО «DiAyriss» URL: <http://diiris.com/oborudovanie/diagnostika-statora/monitoring-lobovyih-chastey-obmotki/nepreryivnyi-monitoring-vibratsii-lobovyih-chastey-obmotki-statora/> (accessed: 08.09.2021) (Rus)
6. Zhimolokhov O.M. Vibration and reliability of turbine generator stator windings in stationary modes. URL: <https://www.dissercat.com/content/vibratsiya-i-nadezhnost-obmotok-statorov-turbogeneratorov-v-statsionarnykh-rezhimakh> (accessed: 08.09.2021) (Rus)
7. Gyzhko Y.I., Zvarytch V.M., Myslovych M.V., Sysak R.M., Tukalo I.I. Perspectives of modernization of systems of vibration monitoring and vibrodiagnostics of electrical power plants equipment on the example of Trypilska TES. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2012. No 33. Pp. 53–61. (Rus)
8. Yuling He. Electromagnetic Force and Mechanical Response of Turbo-Generator End Winding under Electro-mechanical Faults. *Mathematical Problems in Engineering*. December 2021. Vol 1. Pp. 1–19. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/9064254>
9. He Y., Gerada D., Ming X.X. Impact of stator inter-turn-short-circuit position on end winding vibration in synchronous generators. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2020. Vol. 36. No. 2. Pp. 22–27. DOI: <https://doi.org/10.1109/TEC.2020.3021901>
10. Meng Q., He Y. Mechanical response before and after rotor inter-turn short-circuit fault on stator windings in synchronous generator. Proc. of the 2018 *IEEE Student Conference on Electric Machines and Systems*. HuZhou, China, December 2018. Pp. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.1109/SCEMS.2018.8624696>
11. Kuchynskiy K.A. Effect on circulation disorders distillate on thermomechanical stresses in isolation of the stator winding of the turbogenerator by power 800 MW. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2014. No 1. Pp. 75–80. (Rus)
12. Glebov I.A., Danilevich Ya.B. The scientific basis of designing of a turbogenerators. Leningrad: Nauka, 1986. 184 p. (Rus)
13. Golodnova O.S., Rostik G.V. The analysis and actions for the prevention of damages of cores of stators turbogenerators. *Elektrosila*. 2004. No 43. Pp. 56–64. (Rus)
14. Kuchynskiy K.A. Influence of the degree of fixing the winding at the end of the slot of the turbogenerator stator on thermomechanical characteristics of its core isolation. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2022. No 61. Pp. 31–36. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2022.61.031>
15. Vygovskiy A.V. Analysis, prediction and control of thermomechanical defects in the water cooling system of the stator windings of powerful turbogenerators NPP. *Problemy bezpeky atomnyh elektrostantsiy i Chornobylya*. 2015. No. 24. Pp. 20–26. (Ukr)
16. Kramarskiy V.A., Cheremlsov I.Ya., Gruboy O.P., Tytko O.I., Penskiy V.F., Minko O.M. Electric machine stator. Patent UA No 99571, 2015. (Ukr)

Надійшла: 04.09.2022

Прийнята: 27.09.2022

Submitted: 04.09.2022

Accepted: 27.09.2022

## НАПІВПРОВІДНИКОВІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

УДК-621.314

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2022.63.052>

### СИМЕТРИЧНІ ІНДУКТИВНО-ЄМНІСНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ З ОДНОФАЗНИМ МОСТОВИМ ВИПРЯМЛЯЧЕМ, АКТИВНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ ТА ЄМНІСНИМ ФІЛЬТРОМ

**В.М. Губаревич**\*, канд. техн. наук, **Ю.В. Маруня**\*\* , канд. техн. наук, **В.П. Кабан**, канд. техн. наук, **В.Ю. Матвєєв**, канд. техн. наук  
Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна  
E-mail: [marunia@ied.org.ua](mailto:marunia@ied.org.ua)

*Досліджено електромагнітні процеси в однофазному мостовому випрямлячі з активним навантаженням та ємнісним фільтром під час живлення його від симетричного індуктивно-ємнісного перетворювача (ІЄП), виконаного за схемою МІ, та проведено порівняння його якісних характеристик з ІЄП за схемою ТІ-LCL. Встановлено, що схема МІ має кращі показники питомої потужності, проте використання мостової структури ІЄП є недоцільним без поліпшення її електромагнітної сумісності з мережею живлення. Запропоновано способи вдосконалення такого ІЄП. Бібл. 14, рис. 4, таблиця.*

**Ключові слова:** випрямляч, активне навантаження, ємнісний фільтр, індуктивно-ємнісний перетворювач, електромагнітна сумісність.

Індуктивно-ємнісні перетворювачі джерела напруги в джерело струму (ІЄП) займають особливе місце серед аналогічних перетворювачів завдяки низці переваг. Це схемна і конструктивна простота, висока надійність, високий ККД, можливість паралельної роботи блоків ІЄП на різні номінальні струми й потужності та ін. Тому вони набули широкого впровадження в різних галузях народного господарства [1-6]. Як зазначено в роботі [7], найбільш раціонально застосовувати в розробках  $\Gamma$ -,  $T$ -,  $\Pi$ - та  $M$ - подібні структури ІЄП. Серед них  $T$ -,  $\Pi$ - та  $M$ -подібні структури є симетричними, бо мають однакову конфігурацію відносно мережі живлення та навантаження. Елементами цих схем за активного навантаження ІЄП тече струм синусоїдної форми, і оптимізація реактивних потужностей елементів проводиться за алгоритмом, наведеним у роботі [7]. Вибір встановленої реактивної потужності елементів виконується з врахуванням параболічного характеру зміни залежностей абсолютних ( $Q$ ) та питомих ( $q$ ) потужностей від відносного опору навантаження ( $X_2$ ). Позначки, наведені в дужках, будуть розшифровані далі.

У роботі [8] проводилось порівняння схем  $\Gamma I-LC$  та симетричного  $T I-LCL$  (згідно з класифікацією, наведеною у роботі [7]) при їхній роботі на випрямляч з ємнісним фільтром та активним навантаженням ( $B C_\phi R_n$ ). Дослідження виявило одну особливість, яка полягає в тому, що абсолютні потужності реактивних елементів мають лінійну залежність від опору навантаження ( $X_2$ ), тому абсолютне значення встановленої потужності однозначно визначається за величиною відносного опору, яка припадає на мінімум питомих потужностей, що мають параболічний характер. Порівняння показало, що симетричний  $T I-LCL$  має кращі якісні характеристики. Це менші значення питомої потужності реакторів та кращі показники електромагнітної сумісності (ЕМС), основними з яких є  $THD_I$  та  $\cos \varphi$  [9]. Дослідження мостового ІЄП, виконаного за схемою МІ, при його роботі на  $B C_\phi R_n$  не проводилось. Тому метою цієї роботи є визначення якісних характеристик у системі «однофазний мостовий індуктивно-ємнісний перетворювач джерела напруги в джерело струму – мостовий випрямляч з активним навантаженням та ємнісним фільтром» та порівняння якісних характеристик з ІЄП, виконаного за схемою  $T I-LCL$ .



На рис. 1 наведено схему випрямляча, на вході якого включений симетричний ІСП за схемою *M1*. Для отримання якісних характеристик і дослідження електромагнітних процесів схеми було проведено ряд експериментів із застосуванням одного з методів математичної теорії планування експерименту [10, 11], а саме ортогонального плану другого порядку, який дає достатню адекватність моделі об'єкта дослідження.

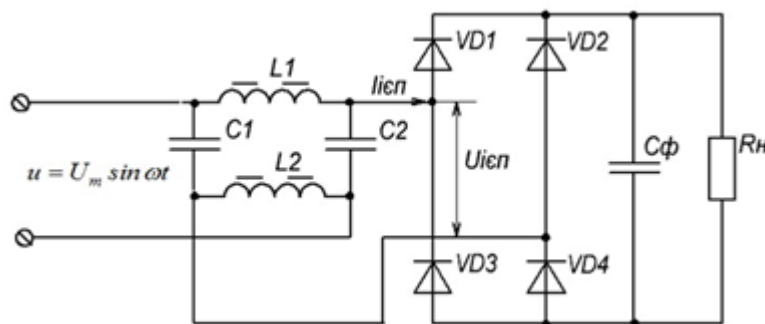


Рис. 1

Функціями цілі  $Y_N \in THDi, \cos\varphi$ , абсолютні  $Q$  та питомі  $q$  потужності  $Q_{L\Sigma}, q_{L\Sigma}, Q_{C\Sigma}, q_{C\Sigma}$  реакторів  $L1, L2$  та конденсаторів  $C1, C2$ , де  $q_{L\Sigma} = q_{L1} + q_{L2} = 2I_L^2 x_L / I_{IC\Pi} \cdot U_{IC\Pi} = Q_{L\Sigma} / S_{HIC\Pi}$ ,  $q_{C\Sigma} = q_{C1} + q_{C2} = 2I_C U_C / I_{IC\Pi} \cdot U_{IC\Pi} = Q_{C\Sigma} / S_{HIC\Pi}$ ,  $S_{HIC\Pi} = I_{IC\Pi} \cdot U_{IC\Pi}$ ;  $I_L, I_C, I_{IC\Pi}, U_L, U_C, U_{IC\Pi}$  – діючі значення струмів та відповідно напруг ІСП;  $S_{HIC\Pi}$  – повна потужність на виході ІСП [12].

За фактори, що варіюються, обрано:  $X_1$  – відношення ємності  $C_\phi$  конденсатора фільтра до ємності  $C1=C2=C$  конденсаторів ІСП та  $X_2$  – відношення опору навантаження  $R_H$  до опору реактора ІСП  $x_L = \omega L$ , (де  $L1=L2=L$ ). Експеримент проводився за схемою, зображеною на рис. 1, з наступними параметрами: напруга живлення 230 В, частота напруги 50 Гц, потужність навантаження, як і в [8], варіювалась від 0,3 до 1,2 кВт. ІСП виконано за схемою *M1* з індуктивністю реакторів  $L=184$  мГн і ємністю конденсаторів  $C=50$  мкФ. Струм і напруга на вході та виході випрямляча реєструвалися та вимірювалися приладом *CA PowerQualityAnalyzer*. Результати вимірювань та обчислень наведено у таблиці.

| N | $x_i$ |       |       |        |        |                 | $Y_N$      |               |               |               |              |               |               |
|---|-------|-------|-------|--------|--------|-----------------|------------|---------------|---------------|---------------|--------------|---------------|---------------|
|   | $x_0$ | $x_1$ | $x_2$ | $x'_3$ | $x'_4$ | $x_1 \cdot x_2$ | $THDi, \%$ | $\cos\varphi$ | $Q_{L\Sigma}$ | $Q_{C\Sigma}$ | $S_{HIC\Pi}$ | $q_{L\Sigma}$ | $q_{C\Sigma}$ |
| 1 | +1    | -1    | -1    | 1/3    | 1/3    | +1              | 69         | 0,748         | 333,96        | 693,6         | 243,2        | 1,373         | 2,852         |
| 2 | +1    | +1    | -1    | 1/3    | 1/3    | -1              | 67         | 0,754         | 333,96        | 693,6         | 243,2        | 1,373         | 2,852         |
| 3 | +1    | -1    | +1    | 1/3    | 1/3    | -1              | 42,2       | 0,866         | 1712,88       | 1288          | 1131,6       | 1,514         | 1,138         |
| 4 | +1    | +1    | +1    | 1/3    | 1/3    | +1              | 41,8       | 0,867         | 1757,66       | 1316          | 1131,6       | 1,553         | 1,163         |
| 5 | +1    | -1    | 0     | 1/3    | -2/3   | 0               | 48,1       | 0,839         | 932,06        | 912           | 720          | 1,295         | 1,267         |
| 6 | +1    | +1    | 0     | 1/3    | -2/3   | 0               | 47,3       | 0,843         | 932,06        | 912           | 728          | 1,280         | 1,253         |
| 7 | +1    | 0     | -1    | -2/3   | 1/3    | 0               | 69,3       | 0,747         | 333,96        | 693,6         | 243,2        | 1,373         | 2,852         |
| 8 | +1    | 0     | +1    | -2/3   | 1/3    | 0               | 42         | 0,868         | 1757,66       | 1353,6        | 1148         | 1,531         | 1,179         |
| 9 | +1    | 0     | 0     | -2/3   | -2/3   | 0               | 48,5       | 0,839         | 925,5         | 936           | 720          | 1,285         | 1,30          |

За попередніми дослідженнями [13-14] за основу були прийняті значення для діапазонів змін факторів  $X_1$  та  $X_2$ . Перший фактор  $X_1$  змінювався в діапазоні від  $X_{1min}=9$  до  $X_{1max}=18$  за рахунок зміни ємності конденсатора  $C_\phi$  від 450 мкФ до 900 мкФ (основний рівень 675 мкФ, інтервал варіювання 225 мкФ). У другому факторі  $X_2$  змінювався опір навантаження від 24 до 110 Ом, (основний рівень 67 Ом, інтервал варіювання 43 Ом). Водночас  $X_{2min}=0,415$ , а  $X_{2max}=1,87$ .

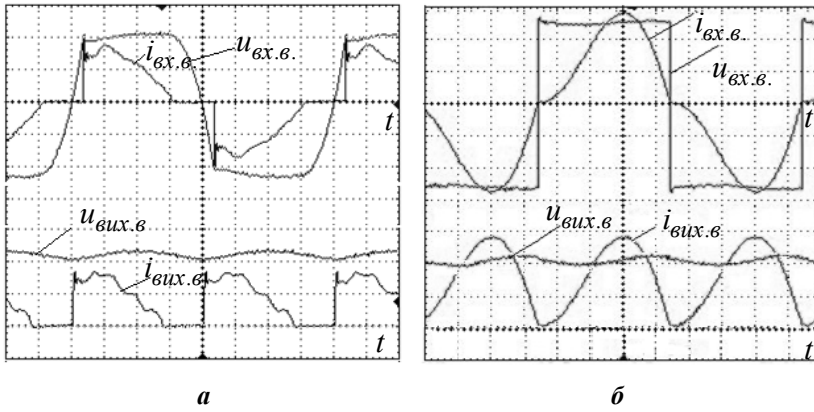


Рис. 2

Як приклад для досліджу № 9 (див. табл.) наведено осцилограми струмів та напруг на вході та виході випрямляча, що живиться від ІЄП за схемою *MI* (рис. 2 а), а також для порівняння такі самі струми і напруги для випадку, коли використовується симетричний ІЄП, але за схемою *TI-LCL* (рис. 2 б). Характер струмів для симетричних ІЄП за схемою *MI*

має перервний вигляд, в той час схема *TI-LCL* має майже синусоїдну форму струму.

Після кодування факторів з урахуванням обраних інтервалів варіювання було проведено експерименти з ортогонального плану другого порядку. Матрицю планування кодіваних значень факторів наведено у таблиці (розділ  $x_i$ , в якому  $x'_3 = x_1^2 - 2/3$  та  $x'_4 = x_2^2 - 2/3$ ). На підставі реалізованого ортогонального плану другого порядку було визначено коефіцієнти поліномів  $b_i$  за формулою

$$b_i = \left( \sum_{N=1}^9 x_{iN} Y_N \right) \left( \sum_{N=1}^9 x_{iN}^2 \right)^{-1}$$

і отримано наступні поліноми:

$$\hat{Q}_{LS} = 933,38 + 7,46x_1 + 704,38x_2 - 5,28x_1^2 + 108,48x_2^2 + 11,18x_1x_2, \quad (1)$$

$$\hat{Q}_{CS} = 936,8 + 4,66x_1 + 312,8x_2 - 25,2x_1^2 + 86,4x_2^2 + 7x_1x_2, \quad (2)$$

$$\hat{S}_{HIEП} = 725,42 + 1,33x_1 + 446,93x_2 - 4,13x_1^2 - 32,53x_2^2, \quad (3)$$

$$\hat{q}_{LS} = 1,286 + 4,4 \cdot 10^{-3}x_1 + 7,96 \cdot 10^{-2}x_2 + 1 \cdot 10^{-3}x_1^2 + 0,167x_2^2 + 1 \cdot 10^{-2}x_1x_2, \quad (4)$$

$$\hat{q}_{CS} = 1,289 + 3,34 \cdot 10^{-3}x_1 - 0,85x_2 - 2,34 \cdot 10^{-2}x_1^2 + 0,736x_2^2 + 5 \cdot 10^{-3}x_1x_2, \quad (5)$$

$$\cos \phi = 0,839 + 1,83 \cdot 10^{-3}x_1 + 5,87 \cdot 10^{-2}x_2 + 1,5 \cdot 10^{-3}x_1^2 - 3,2 \cdot 10^{-2}x_2^2 - 1,25 \cdot 10^{-3}x_1x_2. \quad (6)$$

Отримані експериментальні значення  $Q_{LS}$ ,  $q_{LS}$ ,  $Q_{CS}$ ,  $q_{CS}$ ,  $S_{HIEП}$ ,  $\cos \phi$  відрізняються від значень  $\hat{Q}_{LS}$ ,  $\hat{q}_{LS}$ ,  $\hat{Q}_{CS}$ ,  $\hat{q}_{CS}$ ,  $\hat{S}_{HIEП}$ ,  $\cos \phi$ , які розраховано за поліномами (1-6), не більше як на 5 %.

Для зручності використання отриманих коефіцієнтів перетворення випрямляча доцільно перейти від кодованих значень факторів до їх натуральних значень за формулою  $x_i = (X_i - X_{icp}) / (X_{imax} - X_{icp})$ , де  $X_{icp} = (X_{imax} + X_{imin}) / 2$ ,  $X_{icp}$  – основний рівень незалежної змінної  $X_i$ .

Після перетворення поліномів (1-6) маємо:

$$\hat{Q}_{CS} = 450,72 + 32,16X_1 + 28,18X_2 - 1,24X_1^2 + 163,26X_2^2 + 2,14X_1X_2, \quad (7)$$

$$\hat{Q}_{LS} = 77,34 + 4,8X_1 + 453,9X_2 - 0,26X_1^2 + 204,98X_2^2 + 3,42X_1X_2, \quad (8)$$

$$\hat{S}_{HIEП} = -97,8 + 5,8X_1 + 754,75X_2 - 0,204X_1^2 - 61,47X_2^2, \quad (9)$$

$$\hat{q}_{LS} = 1,616 - 3,84 \cdot 10^{-3}X_1 - 0,652X_2 + 4,92 \cdot 10^{-5}X_1^2 + 0,316X_2^2 + 3,06 \cdot 10^{-3}X_1X_2, \quad (10)$$

$$\hat{q}_{CS} = 4,244 + 3,02 \cdot 10^{-2}X_1 - 4,36X_2 - 1,156 \cdot 10^{-3}X_1^2 + 1,392X_2^2 + 1,528 \cdot 10^{-3}X_1X_2, \quad (11)$$

$$\cos \phi = 0,617 - 1,15 \cdot 10^{-3}X_1 + 0,22X_2 + 7,4 \cdot 10^{-5}X_1^2 - 0,06X_2^2 - 3,82 \cdot 10^{-4}X_1X_2, \quad (12)$$

На рис. 3 наведено графіки залежності  $\hat{Q}_{CS}$ ,  $\hat{Q}_{LS}$ ,  $\hat{Q}_C$  і  $\hat{S}_{HIEП}$  від фактора  $X_2$  за постійного значення фактора  $X_1 = 18$  ІЄП за схемами  $MI$  та  $TI-LCL$ . На рис. 3 можна побачити, що всі значення потужностей повільно зростають за умови збільшення фактора навантаження  $X_2$ , тому для отримання значень  $X_2$ , за яких будуть розраховуватись оптимальні абсолютні значення реактивних елементів, перейдемо до визначення мінімумів залежностей питомих потужностей  $\hat{q}_{CS}$ ,  $\hat{q}_{LS}$ , що мають параболічний характер відносно зміни опору  $X_2$ .

На рис. 4 наведено графічні залежності питомих потужностей  $\hat{q}_{CS}$ ,  $\hat{q}_{LS}$  схеми  $MI$ , які розраховані за поліномами (10-11) за постійного значення фактора  $X_1 = 18$ . Для схеми  $TI-LCL$  графічні залежності питомих потужностей  $\hat{q}_{LS}$ ,  $\hat{q}_C$  було запозичено з роботи [13], також за постійного значення фактора  $X_1 = 18$ . У поліномах (10-11) значення коефіцієнтів при факторі  $X_1$  майже на порядок менші за значення коефіцієнтів при факторі  $X_2$ , тому було визначено значення питомих потужностей  $\hat{q}_{CS}$ ,  $\hat{q}_{LS}$  та  $\hat{q}_C$  при одному постійному значенні фактора  $X_1 = 18$ .

У ході досліджень було визначено похідні від фактора  $X_2$  у поліномах (10-11) за постійних значень фактора  $X_1 = 18$ , які вказують на те, що мінімум є у функціях  $\hat{q}_{CS}$ ,  $\hat{q}_{LS}$  і  $\hat{q}_C$ . Це підтверджують графіки, наведені на рис. 4. Для порівняння схем  $MI$  та  $TI-LCL$  було визначено для схеми  $MI$  похідні функцій  $\hat{q}_{LS}$ ,  $\hat{q}_{CS}$  і значення фактора  $X_2$ , за яких ці функції мають мінімум для конденсаторів  $\hat{q}_{CS} = 1,04$  за  $X_2 = 1,56$  і для реакторів  $\hat{q}_{LS} = 1,28$  за  $X_2 = 0,95$ . Для схеми  $MI$  з рис. 4 видно, що функція  $\hat{q}_{LS}$  змінюється в

малому діапазоні (1,28...1,52 в.о.), тому її значення обираємо орієнтуючись на мінімум функції  $\hat{q}_{CS}$ , що змінюється в значно широкому діапазоні відносних одиниць. Цей мінімум складає  $\hat{q}_{CS} = 1,04$  і для  $\hat{q}_{LS}$  визначаємо 1,39 в.о (при значеннях факторів  $X_2 = 1,56$  і  $X_1 = 18$ ).

Таким чином, у схемі  $MI$  сума питомих потужностей конденсаторів  $C1$ ,  $C2$  дорівнює  $\hat{q}_{CS} = 1,04$ , що на 0,79 в.о. менше, ніж у ІЄП  $TI-LCL$ , і має потужність реакторів  $\hat{q}_{LS} = 1,39$ , що на 0,12 в.о. менша у порівнянні зі схемою  $TI-LCL$ , де  $\hat{q}_{LS} = 1,51$  в.о.

Схема  $MI$  за питомими потужностями реактивних елементів має найкращі показники цих параметрів, проте такі переваги нівелюються в зв'язку зі значно гіршим коефіцієнтом потужності схеми  $\cos \phi = 0,748...0,839$  та абсолютно недопустимим значенням  $THD_I > 40\%$  (див. табл.). Однак для вирішення цієї проблеми на практиці авторами пропонуються такі способи вдосконалення схеми. З метою покращення електромагнітної сумісності з мережею живлення достатнім є введення поздовжньої додаткової індуктивності, співрозмірної з  $L$  ІЄП, між виходом ІЄП та входом мостового випрямляча для отримання значення  $THD_I < 7\%$ , а

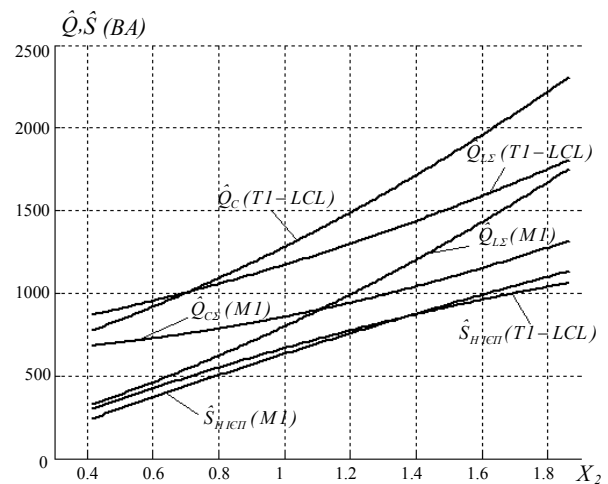


Рис. 3

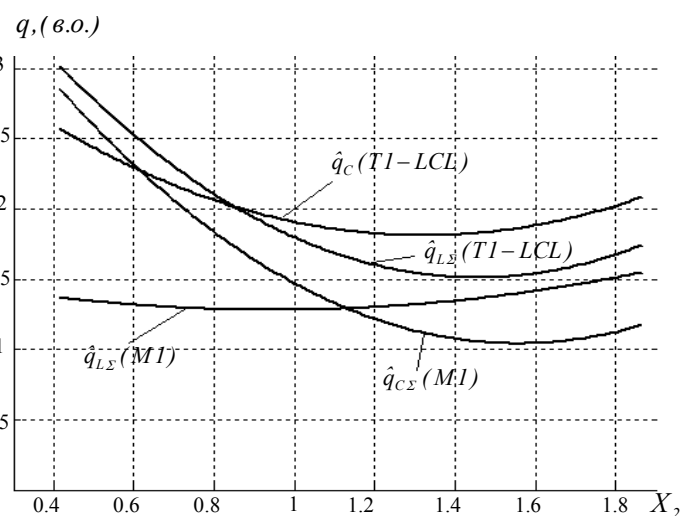


Рис. 4

нерезонансний режим настройки ІСП за схемою *M1*, при якому  $C=100$  мкФ, дозволяє отримати коефіцієнт потужності схеми до 0,97. Наведені результати отримано шляхом імітаційного моделювання в програмному середовищі *MicroCap-2010*, адекватність розробленої моделі була раніше підтверджена численними натурними експериментами.

**Висновок.** Мостовий ІСП, виконаний за схемою *M1*, за умови його роботи на випрямляч з ємнісним фільтром та активним навантаженням, має кращі показники питомої потужності порівняно з ІСП за схемою *T1-LCL*. Проте встановлено, що ІСП мостової структури має значно гірші показники електромагнітної сумісності з мережею живлення. У роботі запропоновано та приведено приклад способів вдосконалення ІСП за схемою *M1*, що підтверджує можливість покращення його електромагнітної сумісності з мережею живлення.

*Роботу виконано за держбюджетною темою «Аналіз, синтез та розвиток принципів побудови гібридних фільтрів гармонік струму як універсальних засобів покращення електромагнітної сумісності пристроїв перетворювальної техніки з мережею живлення» (шифр «Гібрид»), КПКВК 6541030.*

1. Милях А.Н., Волков И.В. Системы неизменного тока на основе индуктивно-емкостных преобразователей. К.: Наукова думка, 1974. 216 с.
2. Саратовский Р.Н. Источник неизменного тока для питания установок индукционного нагрева *Техн. электродинамика*. 2009. № 4. С. 12–15.
3. Коротынский А.Е., Махлин Н.М., Полосков С.И. Использование индуктивно-емкостных преобразователей в многопостовых сварочных системах. *Тяжелое машиностроение*. 2009. № 7. С. 31–34.
4. Konesev S.G., Kirillov R.V., Khazieva R.T. Inductive-capacitive converters for high-voltage secondary power supplies. IEEE International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), 2019. DOI: <https://doi.org/10.1109/FarEastCon.2019.8934018>
5. Дозоров С.А. Исследование и разработка индуктивно-емкостных источников питания: автореф. дис. канд. техн. наук: спец. 05.09.03 “Электротехнические комплексы и системы”. Санкт-Петербург, 2013. 18 с.
6. Michael L. G. Kissin; Chang-Yu Huang; Grant A. Covic; John T. Boys. Detection of the tuned point of a fixed-frequency LCL resonant power supply. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009. 24(4):1140–1143. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2008.2011641>
7. Волков И.В., Губаревич В.Н., Исаков В.Н., Кабан В.П. Принципы построения и оптимизация схем индуктивно-емкостных преобразователей. К.: Наукова думка, 1981. 173 с.
8. Спірін В.М., Губаревич В.М., Маруня Ю.В., Салко С.В. Якісні характеристики однофазного мостового випрямляча з активним навантаженням та ємнісним фільтром при живленні від джерела струму. *Техн. электродинамика*. 2020. № 2. С. 23–27. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.02.023>
9. ДСТУ ІЕС 61000-3-2:2016. Електромагнітна сумісність. Частина 3-2. Норми. Норми на емісію гармонік струму (для сили вхідного струму обладнання не більше ніж 16 А на фазу) (ІЕС 61000-3-2:2014, IDT)
10. Пинчук С.И. Организация эксперимента при моделировании и оптимизации технических систем. Днепропетровск: Дива, 2008. 248 с.
11. Резников С., Бочаров В., Коняхин С., Гуренков Н. Моделирование индуктивно-емкостных преобразователей (ИЕП) с выпрямительно-емкостной нагрузкой. *Силовая электроника*. 2010. № 3. С. 48–53.
12. Демирчан К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники. Т. 1. СПб.: Изд-во Питер, 2006. 464 с.
13. Спірін В.М., Губаревич В.М., Маруня Ю.В., Салко С.В., Гребенюк В.Г. Оптимізація індуктивно-ємнісного перетворювача з мостовим однофазним випрямлячем, ємнісним фільтром та активним навантаженням за питомими потужностями електромагнітних елементів. *Техн. электродинамика*. 2019. № 6. С. 25–29. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.06.025>
14. Спірін В.М., Губаревич В.М., Маруня Ю.В., Салко С.В., Гребенюк В.Г. Визначення коефіцієнтів перетворення струмопараметричного мостового однофазного випрямляча з паралельним активно-ємнісним навантаженням. *Техн. электродинамика*. 2019. № 5. С. 43–48. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.05.043>

## SYMMETRIC INDUCTIVE-CAPACITIVE CONVERTERS WITH SINGLE-PHASE BRIDGE RECTIFIER, ACTIVE LOADS AND CAPACITARY FILTER

V.M. Gubarevich, Yu.V. Marunia, V.P. Kaban, V.Yu. Matveev

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,  
pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine  
e-mail: [marunia@ied.org.ua](mailto:marunia@ied.org.ua)

*The electromagnetic processes in a single-phase bridge rectifier with an active load and a capacitive filter during its power supply from a symmetrical inductive-capacitive converter (ICC) made according to the M1 scheme were studied,*

and a comparison of its quality characteristics with the ICC according to the TI-LCL scheme was carried out. It was established that the M1 scheme has better specific power indicators, however, the use of the ICC bridge structure is impractical without improving its electromagnetic compatibility with the power supply network. Methods of perfecting such an ICC are proposed. Ref. 14, fig. 4, table.

**Keywords:** rectifier, active load, capacitive filter, inductive-capacitive converter, electromagnetic compatibility.

1. Milyakh A.N., Volkov I.V. AC systems based on inductive-capacitive converters. Kyiv: Naukova dumka, 1974. 216 p. (Rus)
2. Saratovsky R.N. Constant current source for power supply of induction heating installations. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2009. No 4. Pp. 12–15. (Rus)
3. Korotynsky A.E., Makhlin N.M., Poloskov S.I. Use of inductive-capacitive converters in multi-station welding systems. *Tiazheloe mashinostroenie*. 2009. No 7. Pp. 31–34. (Rus)
4. Konesev S.G., Kirillov R.V., Khazieva R.T. Inductive-capacitive converters for high-voltage secondary power supplies. 2019 IEEE International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), 2019. DOI: <https://doi.org/10.1109/FarEastCon.2019.8934018>
5. Dozorov S.A. Research and development of inductive-capacitive power sources: autoref. thesis Ph.D. technical Sciences: specialist 05.09.03 Electrotechnical complexes and systems. St. Petersburg, 2013. 18 p. (Rus)
6. Michael L. G. Kissin; Chang-Yu Huang; Grant A. Covic; John T. Boys. Detection of the tuned point of a fixed-frequency LCL resonant power supply. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2009. 24(4):1140–1143. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2008.2011641>
7. Volkov I.V., Gubarevich V.N., Isakov V.N., Kaban V.P. Principles of construction and optimization of circuits of inductive-capacitive converters. Kyiv: Naukova dumka, 1981. 173 p. (Rus)
8. Spirin V.M., Gubarevich V.M., Marunia Yu.V., Salko S.V. Quality characteristics of single-phase bridge rectifier with active load and capacitary filter for power from the current source. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2020. No 2. Pp. 23–27. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.02.023> (Ukr)
9. DSTU IEC 61000-3-2: 2016. Electromagnetic compatibility. Part 3-2. Norms. Current harmonic emission standards (for equipment input current not more than 16 A per phase) (IEC 61000-3-2: 2014, IDT). (Ukr)
10. Pinchuk S.I. Organization of an experiment in modeling and optimization of technical systems. Dnepropetrovsk: Diva, 2008. 248 p. (Rus)
11. Reznikov S., Bocharov V., Konyakhin S., Gurenkov N. Modeling of inductive-capacitive converters (IEP) with rectifier-capacitive load. *Silovaia elektronika*. 2010. No 3. Pp. 48–53. (Rus)
12. Demirchan K.S., Neumann L.R., Korovkin N.V., Chechurin V.L. Theoretical foundations of electrical engineering. Vol. 1. Sanct Peterburg: Izd-vo Piter, 2006. 464 p. (Rus)
13. Spirin V.M., Gubarevich V.M., Marunia Yu.V., Salko S.V., Grebenyuk V.G. Optimization of inductive-capacital converter with bridge one-phase rectifier, capacitary filter and parallel active load. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2019. No 6. Pp. 25–29. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.06.025>. (Ukr)
14. Spirin V.M., Gubarevich V.M., Marunia Yu.V., Salko S.V., Grebenyuk V.G. Determination of the coefficient of the transformation of a current parameter bridge of a single-phase rectifier with parallel active-capacitive load. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2019. No 5. Pp. 25–29. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.05.043>. (Ukr)

Надійшла: 28.06.2022

Прийнята: 14.07.2022

Submitted: 28.06.2022

Accepted: 14.07.2022

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У КОЛІ УМОВНО ДВНАДЦЯТИФАЗНОГО ТИРИСТОРНОГО КОМПЕНСАТОРА ДЛЯ КОРЕКЦІЇ ПЕРЕХІДНИХ ПУСКОВИХ РЕЖИМІВ В ЕЛЕКТРИЧНІЙ МЕРЕЖІ

**О.І. Чиженко\***, докт. техн. наук, **О.Б. Рибіна**, канд. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна

e-mail: [alivchizh@ukr.net](mailto:alivchizh@ukr.net), [rybina@i.ua](mailto:rybina@i.ua)

*Досліджено електромагнітні перехідні процеси у мережі з умовно дванадцятифазним тиристорним компенсатором, призначеним для коригування величини пускового перехідного струму мережі в разі прямого запуску від мережі асинхронних двигунів зіставної з мережею потужності за стрибкоподібного змінення кута управління тиристораму в мостах. Проведено співставлення за такої зміни кута управління тиристорами перехідних струмів у колах двохмостового керованого тиристорного компенсатора з паралельним підключенням мостів із перехідними струмами в умовно дванадцятифазному тиристорному компенсаторі, де ці мости ввімкнено між собою послідовно відносно напруги живлення. Указано переваги техніко-економічних та масогабаритних показників умовно дванадцятифазного перетворювача і його експлуатаційних характеристик під час застосування на практиці порівняно з аналогами. Бібл. 5, рис. 6, табл.*

**Ключові слова:** електрична мережа, електромагнітні перехідні процеси, тиристорний компенсатор.

Для коригування пускових перехідних режимів, що виникають в електричній мережі, модель якої наведено на структурній схемі рис. 1 (більш детально описано в роботах [1, 2]), у разі прямого пуску асинхронних двигунів (АД) зіставної з мережею потужності в роботі [1] було запропоновано використання двомостового тиристорного регульованого компенсатора (ТРК), схему якого наведено на рис. 2 (на структурній схемі рис. 1 його позначено квадратом з написом ТРК).

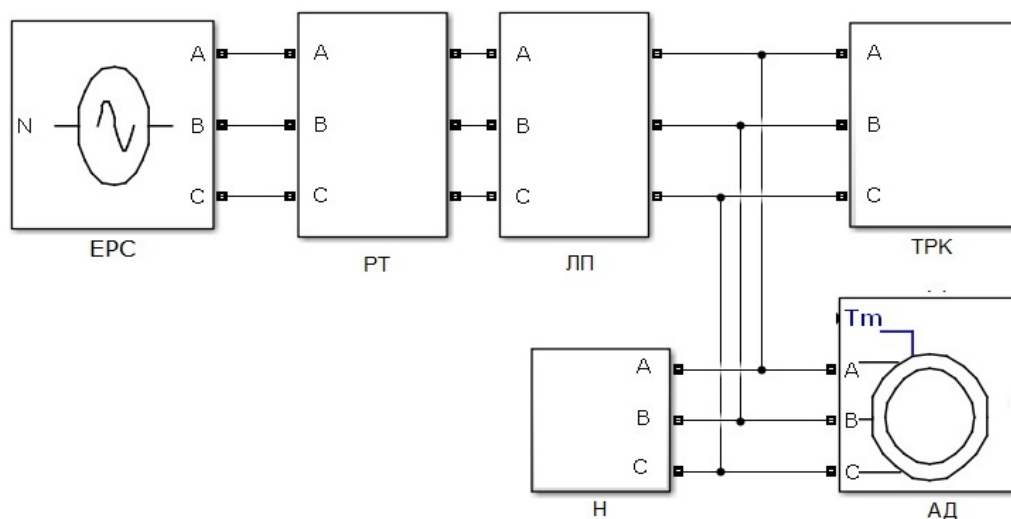


Рис. 1

У роботі [2] було показано, що більш ефективною для використання з цією ж метою є розроблена в цій роботі умовно дванадцятифазна модифікація цього ТРК (рис. 3), у якій: 1) зменшена вдвічі кількість передувімкнених керованим вентиляним мостам ВМ1 і ВМ2 силових конденсаторних батарей КБ із косинусними конденсаторами  $C_{\Delta}$  (далі в ТРК за схемою рис. 3 встановлюємо  $C_{\Delta}=1500$  мкФ); 2) також удвічі зменшена кількість фільтрів вищих гармонік (ФВГ) струмів, а саме фільтрів 11-ї та 13-ї гармонік (зазначимо, що 5-а та 7-а гармоніки в цій схемі ТРК відсутні); 3) суттєво спрощено конструкцію фазозсувного трансформатора ТРФЗ, який забезпечує зсув напруги на вході вентиляного моста ВМ2 на  $30^{\circ}el$  (тут і далі

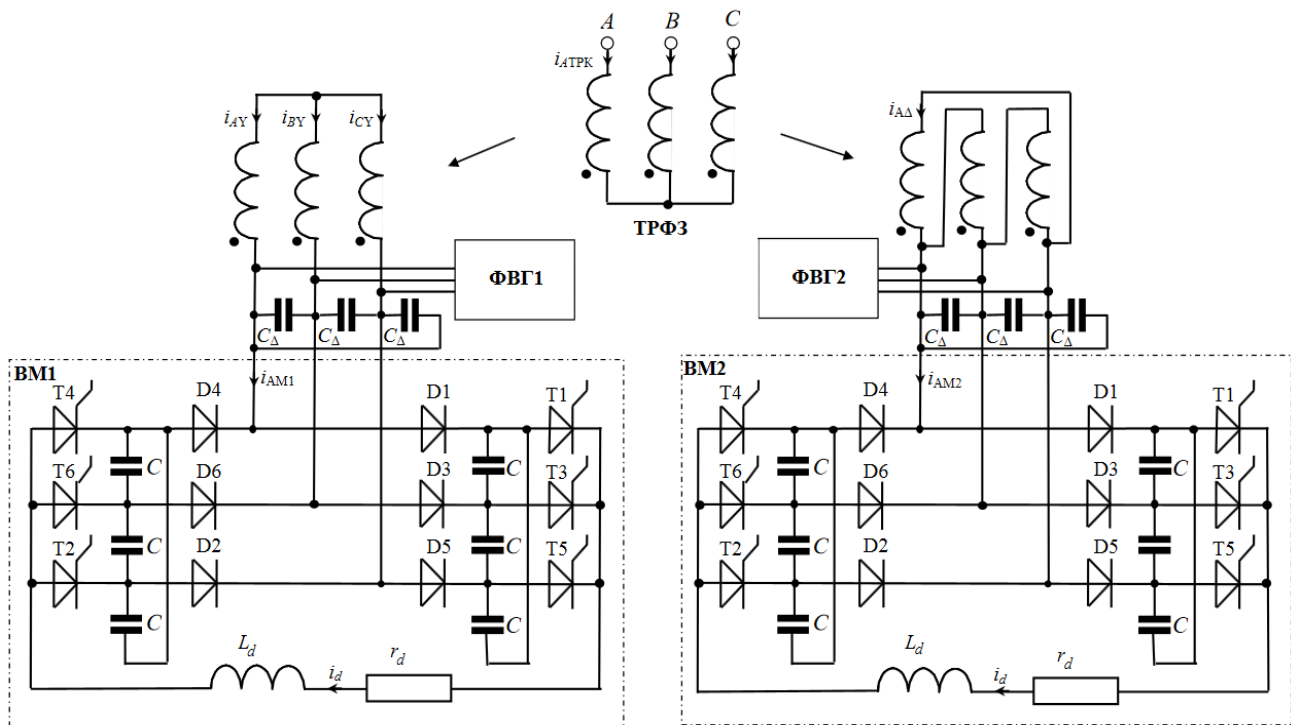


Рис. 2

для позначення електричних градусів використовуємо символ « $^{\circ}el$ ») відносно напруги на вході моста BM1, у якому в ТРК за схемою рис. 3 на одну обмотку менше (BM2 у цьому випадку підключено напряму до мережі – це можливо, коли є доцільним з точки зору погодження потужностей мережі та ТРК); 4) коло випрямленого струму в схемі рис. 3 суттєво спрощено порівняно зі схемою рис. 2, де таких кіл у два рази більше (вони присутні в кожному з двох випрямовуючих вентильних мостів BM1 і BM2), а у ТРК за схемою рис. 3 таке коло спільне для обох мостів BM1 і BM2, внаслідок чого вдвічі зменшується кількість згладжуючих дроселів з індуктивністю  $L_d$ , які є найбільш громіздкими та масивними елементами ТРК, водночас значення самої індуктивності  $L_d$  в ТРК за схемою рис. 3 менша ніж у кожному з мостів BM1 і BM2 у ТРК за схемою рис. 2 (у ТРК за схемою рис. 3 дросель  $L_d$  функціонує з удвічі більшою частотою, оскільки у двохмостовій схемі рис. 2 кожний з мостів BM1 і BM2 є шестипульсним, то схема рис. 3 дванадцятипульсна (звідки й назва цього ТРК – «умовно дванадцятифазний»)).

Вище перераховані особливості схеми рис. 3 зумовлюють її більшу ефективність та кращі техніко-економічні й масогабаритні показники такого ТРК порівняно з ТРК за схемою рис. 2.

Перехідний процес у колі умовно дванадцятифазного ТРК у разі його підключення до мережі рис. 1 розглядаємо, коли відбувається стрибкоподібне змінення кута управління  $\alpha$  тиристорами, а саме від значення  $\alpha=\alpha_1=-94.3^{\circ}el$  до значення  $\alpha=\alpha_2=-83^{\circ}el$  (ці кути відміряються від точок перетину синусоїд ЕРС на вході мережі), і коли параметри елементів мережі рис. 1 такі ж самі, як і прийняті в роботі [2].

Таким чином, **метою роботи** є дослідження в мережі рис. 1 електромагнітних перехідних процесів, які відбуваються в колі умовно дванадцятифазного ТРК за схемою рис. 3 за стрибкоподібної зміни кута управління  $\alpha$  тиристорами від одного їхнього значення до іншого.

Аналіз електромагнітних перехідних процесів у ТРК за схемою рис. 2, які відбуваються внаслідок зміни кута управління  $\alpha$  за різних значень ємності  $C_{\Delta}$  силових конденсаторних батарей, показав [2], що завдяки взаємодії конденсаторної батареї з вторинною обмоткою фазозсувного трансформатора ТРФ3, а саме ємності  $C_{\Delta}$  з індуктивним опором цих обмоток, в обох приєднаних паралельно до мережі за допомогою трансформатора однакових за схемою вентильних мостах BM1 і BM2 випрямлені струми  $i_{d1}$  та  $i_{d2}$  не співпадають за своїми значеннями. При обраних в роботах [1, 2] в мережі рис. 1 та ТРК (за схемою рис. 2) параметрах



цес у колі випрямленого струму характеризується тим, що за однаковий час від початку перехідного процесу в мережі (рис. 1) перехідний струм  $i_d$  встигає зрости до більших значень, ніж кожний із перехідних струмів  $i_{d1}$  та  $i_{d2}$  у ТРК за схемою рис. 2. Це проілюстровано в таблиці, де в першому рядку відкладаються значення часової змінної  $t$ , а в другому та третьому – значення випрямлених струмів  $i_{d1}$  і  $i_{d2}$  у ТРК за схемою рис. 2, а саме в його вентильних мостах ВМ1 та ВМ2 відповідно. В останньому, четвертому рядку таблиці наведено значення випрямленого струму  $i_d$  у ТРК за схемою рис. 3.

Ефективність функціонування кожного з цих ТРК обумовлюються їхньою швидкістю. Остання залежить від швидкоплинності перехідних процесів, що відбуваються в колах цих ТРК у процесі переходу з одного їхнього режиму до іншого, наприклад, коли відбувається стрибкоподібна зміна кута управління  $\alpha$  тиристорами в їхніх вентильних мостах. Важливим у цьому випадку також являється забезпечення якості струму та напруги мережі, які регламентовані міжнародними стандартами [3–5].

Як було показано в роботі [2] під час дослідження електромагнітних процесів, які відбуваються в модифікації ТРК за схемою рис. 2, наявність передувімкнутої конденсаторної батареї КБ з  $C_{\Delta}=1500\text{мкФ}$  дала змогу не тільки знизити на 30 % сумарну потужність вентильних мостів ВМ1 і ВМ2, що, в свою чергу, зменшило амплітуди генерованих ними в мережу вищих гармонік, але й відфільтрувати ці гармоніки таким чином, що вага фільтрів вищих гармонік струму (ФВГ) у ТРК зменшилася до мінімуму, у деяких випадках – навіть до можливості відсутності останніх. Водночас кількість КБ і ФВГ у ТРК за схемою рис. 3 зменшилася вдвічі порівняно з двохмостовим ТРК за схемою рис. 2. Це суттєво спростило конструкцію ТРК і використовується в мережі рис. 1.

Таким чином, умовно дванадцятифазний ТРК має переваги не тільки в техніко-економічних і масогабаритних показниках завдяки зменшенню кількості згладжуючих дроселів і зменшенню вдвічі їхньої сумарної індуктивності, а також і в динамічних характеристиках: є більш швидкодієвим, бо випрямлений струм у ньому зростає швидше.

Розрахунок перехідного режиму в дослідженому ТРК здійснюється за спеціально розробленою програмою, а результати розрахунків подаються у вигляді часових діаграм струмів і напруги на елементах кола цього ТРК. На діаграмах рис. 4 наведено часові діаграми перехідних значень струмів фази А:  $i_{\Delta\Sigma\text{М12}}$ ,  $i_{\text{АТРФ3}}$ ,  $i_{\text{СМ2}}$  (де  $i_{\Delta\Sigma\text{М12}}=i_{\text{АМ1}}+i_{\text{АТРФ3}}$ ) відповідно на вході ТРК (до його фільтрації конденсаторною батареєю КБ), у первинній обмотці ТРФ3 і на вході вентильного моста ВМ1 і струму  $i_{\text{АТРК}}$  – на вході ТРК після фільтрації вищих гармонік цього струму конденсаторною батареєю з конденсаторами ємності  $C_{\Delta}=1500\text{мкФ}$  у її плечі і фільтром ФВГ. На цих діаграмах значення кута  $\alpha=\alpha_1=-94.3^\circ\text{el}$  встановлюється в керованих вентиліях В1-В6 у момент часу  $t=0$ , а в момент часу  $t=0.07\text{с}$  відбувається стрибкоподібна зміна

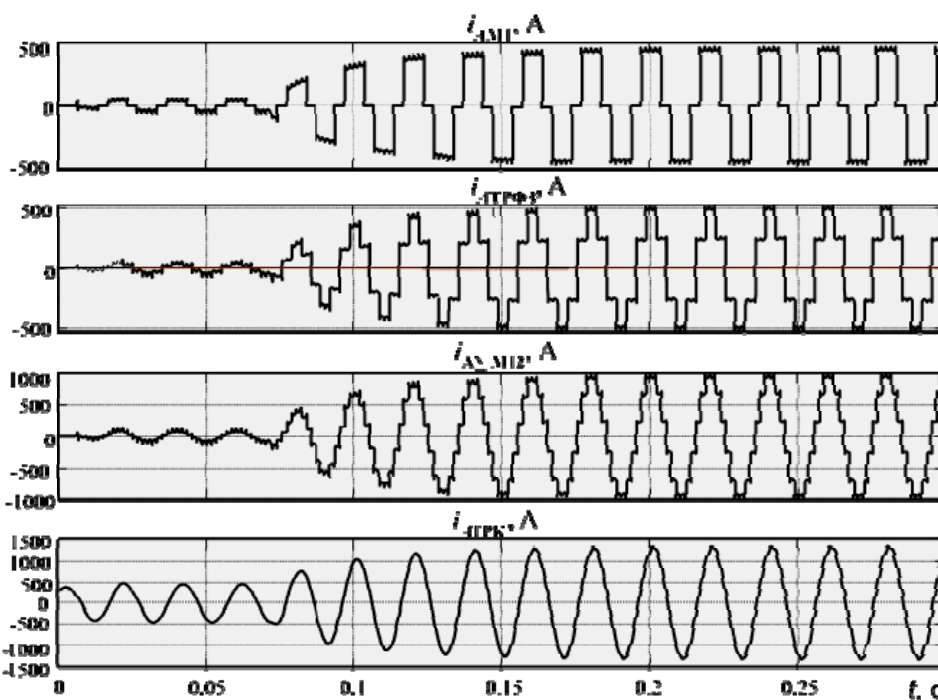


Рис. 4

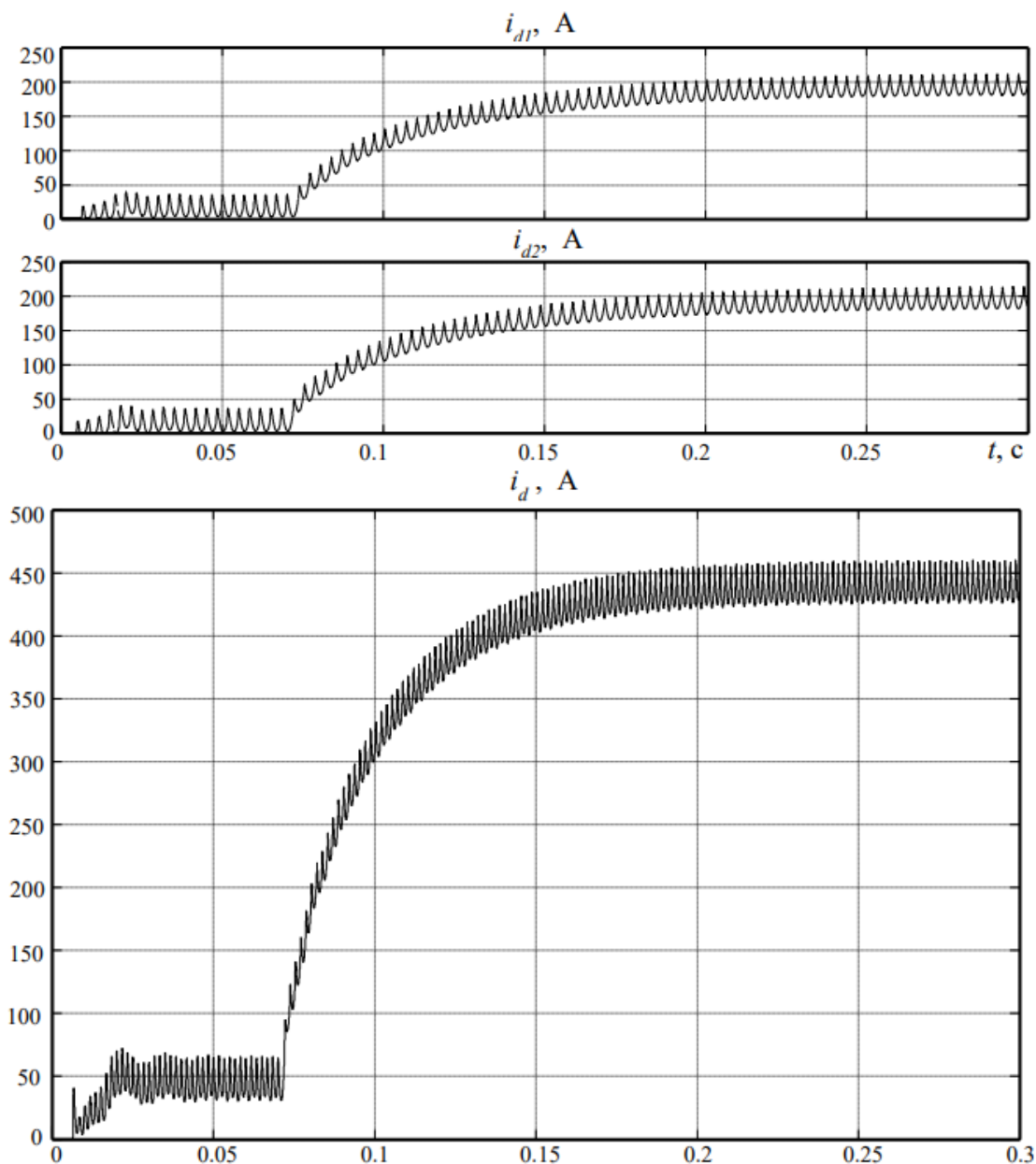


Рис. 5

цього кута до значення  $\alpha = \alpha_2 = -83^\circ$ , внаслідок чого в цей момент починається перехідний процес, що досліджується.

На рис. 5 зображено діаграми для порівняння динаміки змінення в часі перехідних випрямлених струмів  $i_{d1}$  і  $i_{d2}$  в ТРК за схемою рис. 2 з динамікою змінення перехідного випрямленого струму в ТРК за схемою рис. 3.

Пульсуючий випрямлений струм  $i_d$  в усталеному режимі, як відомо, характеризується своєю сталою складовою, тобто так званим середнім значенням випрямленого струму

$$I_d = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} i_d(t) dt. \text{ В усталеному режимі } I_d = \text{const.}$$

У перехідному режимі за наведеною вище формулою можна вираховувати умовну (нерегламентовану) величину  $I_{d\text{пер}}$ , причому окремо для кожного періоду (пульсації) коливального перехідного струму  $i_{d\text{пер}}$ . У перехідному режимі величина  $I_{d\text{пер}}$  змінюється на кожному періоді коливань перехідного струму  $i_{d\text{пер}}$ , тобто величина  $I_{d\text{пер}}$  у перехідному режимі є функцією часу  $-I_{d\text{пер}}(t)$

Хід кривої  $I_{дпер}(t)$  при  $t > 0.07$  с визначається сталою часу  $\tau_d = L_d/r_d$ , де при  $r_d = 0.02$  Ом і  $L_d = 9.4 \times 10^{-3}$  Гн маємо  $\tau_d = 0.47$  с. Цю криву при  $t > \tau_d$  приблизно можна апроксимувати функцією

$$I_{дпер}(t) \approx I_{d \max} \left( 1 - e^{-t/\tau_d} \right) \approx 398 \cdot \left( 1 - e^{-t/0.47} \right).$$

На рис. 6 представлено діаграми для порівняння динаміки зміни перехідних струмів фазних струмів ТРК  $i_{АТРК}$ : на першій діаграмі в умовно дванадцятифазному ТРК за схемою рис. 3, а у другій – у двомостовому ТРК за схемою рис. 2.

На рис. 6 на інтервалі часу  $0 \leq t \leq 0.7$  с перехідний струм на першій діаграмі має значення вдвічі менші, ніж на другій діаграмі. Це обумовлено тим, що в умовно дванадцятифазному ТРК (схема рис. 3) лише одна конденсаторна батарея з ємністю  $C\Delta = 1500$  мкФ в її плечі, а у двомостовому ТРК (схема рис. 2) таких КБ – дві, кожна з яких передувімкнута перед кожним із вентильних мостів ВМ1 і ВМ2.

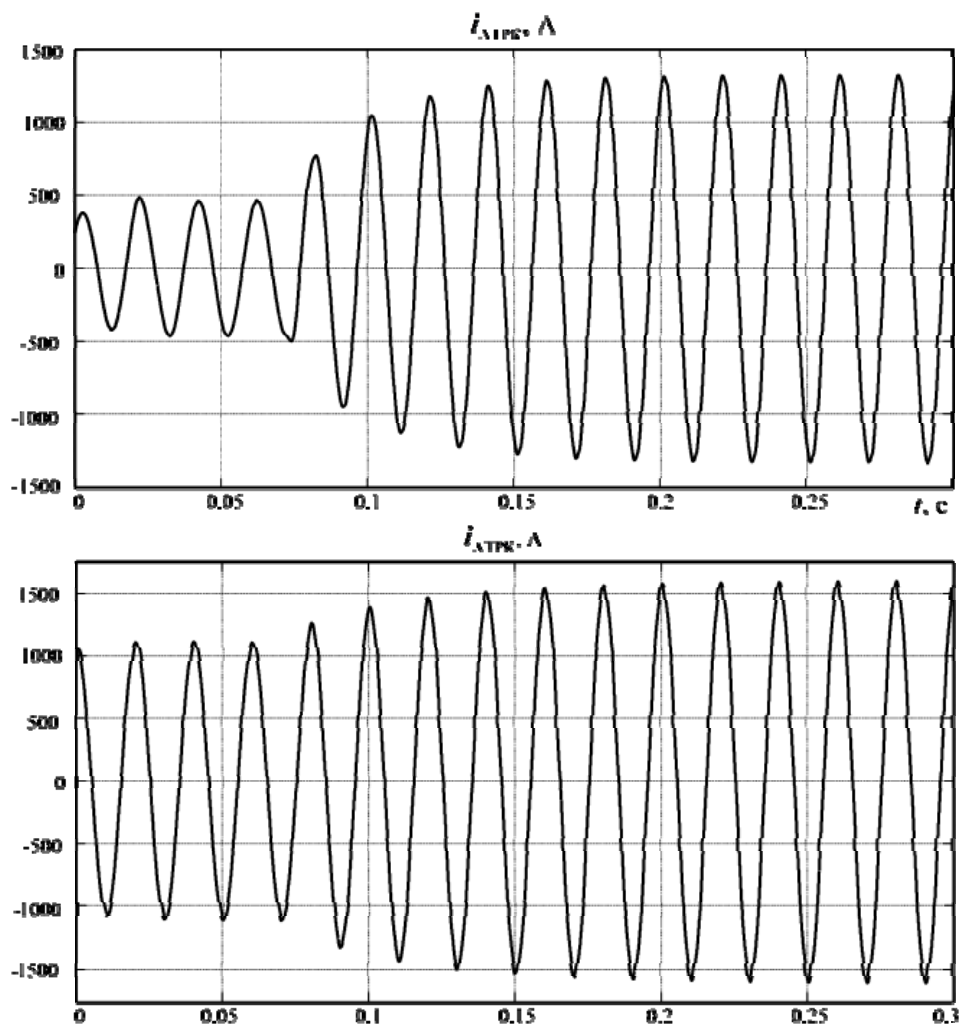


Рис. 6

**Висновок.** Запропонований умовно дванадцятифазний ТРК за схемою рис. 3 для компенсації в перехідному режимі пускових надструмів мереж, які виникають за прямого пуску від них асинхронних двигунів з'єднаної з мережею потужності, відрізняється від альтернативних кращими конструктивними, масогабаритними та техніко-економічними показниками, а саме: має вдвічі меншу кількість КБ і ФВГ, а відповідно і встановлену потужність та номінали елементів, з яких вони складаються; відрізняється суттєво спрощеною конструкцією трансформатора ТРФЗ, у якому на одну обмотку менше; має суттєво спрощену конструкцію кола випрямленого струму вентильного випрямного моста ТРК – має лише одне коло на відміну від двомостового ТРК за схемою рис. 2, у якого їх два, та вдвічі менший згладжувальний дросель. Швидкодія ж умовно дванадцятифазного ТРК принаймні не гірша, ніж у двомостового ТРК за схемою рис. 2, тобто вона є достатньою для вирішення задачі компенсації в мережі пускових надструмів, які виникають під час прямого запуску асинхронних двигунів з'єднаної з мережею потужності.

Фінансується за держбюджетною темою "Моделі та засоби запобігання погіршення якості електропостачання промислових споживачів" (Монітор-4), що виконується за Постановою Бюро ВФТПЕ 29.06.2021 р., протокол № 8. Державний реєстраційний номер роботи КПКВК 6541030.

1. Буткевич О.Ф., Чиженко О.І., Трач І.В. Мінімізація негативного впливу пускових струмів асинхронних двигунів на параметри режиму "слабої" електричної мережі. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2020. Вип. 55. С. 31–39.
2. Блінов І.В., Кириленко О.В., Чиженко О.І. та ін. Розроблення засобів коригування режимів електричних мереж при підключенні потужного обладнання зі специфічними характеристиками. Етап 1. Розроблення схемо-технічного рішення модифікації тиристорного регульованого компенсатора для коригування перехідних режимів мережі під час прямого пуску асинхронних двигунів зіставної з мережею потужності (Р.5.6-2021/385-21). Звіт про НДР № ДР 0121U110509 - К. 2021, 76 с.
3. Про затвердження Кодексу систем передачі: Постанова НКРЕКП від 14.03.2018 № 309.
4. Про затвердження Кодексу систем розподілу: Постанова НКРЕКП від 14.03.2018 № 310.
5. Блинов И.В., Парус Е.В., Полищук Е.Ю., Журавлев И.В. Мониторинг воздушных линий электропередачи с использованием индикаторов повреждений. *Электроэнергетические системы и сети*. 2013. № 4. С. 42–44.

## STUDY OF TRANSIENT PROCESSES IN THE CIRCUIT OF A CONDITIONALLY-TWELVE-PHASE THYRISTOR COMPENSATOR FOR THE CORRECTION OF TRANSIENT START-UP MODES IN THE ELECTRICAL NETWORK

**O.I. Chyzhenko, O.B. Rybina**

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,  
pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine  
e-mail: [alivchizh@ukr.net](mailto:alivchizh@ukr.net), [rybina@i.ua](mailto:rybina@i.ua)

*Electromagnetic transient processes in a network with a conventionally twelve-phase thyristor compensator designed to adjust the value of the starting transient current of the network in the case of direct start from the network of asynchronous motors of comparable power to the network with a jump-like change in the control angle of the thyristors in the bridges were studied. A comparison was made with such a change in the control angle of thyristors of transient currents in the circuits of a two-bridge controlled thyristor compensator with parallel connection of bridges with transient currents in a conventionally twelve-phase thyristor compensator, where these bridges are switched on in series with each other relative to the supply voltage. The advantages of the technical and economic and mass-dimensional parameters of the conventional twelve-phase converter and its operational characteristics when applied in practice in comparison with analogues are indicated. Ref. 5, fig. 6, table.*

**Key words:** electric network, electromagnetic transient processes, thyristor compensator.

1. Butkevych O.F., Chyzhenko O.I., Trach I.V. Negative influence minimization of asynchronous motors' start-up currents on the mode parameters of the electric network of a limited power. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2020. Vol. 61. Pp. 31–39. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2020.55.031> (Ukr)
2. Blinov I.V., Kyrylenko O.V., Chyzhenko O.I. etc. Development of adjustment means of electric networks modes at connection of the powerful equipment with specific characteristics. Stage 1. Development of a circuit-technical solutions of modification of thyristor adjustable compensator for correcting the transient modes of the network during the direct start of asynchronous motors of comparable power to the network. (P.5.6-2021/385-21). Report on SRW № ДР 0121U110509. K. 2021, 76 p. (Ukr)
3. On approval of the Transmission System Code. Resolution of the National Commission for Regulation of Economic Competition. No. 309 of March 14. 2018.
4. On approval of the Distribution Network Code. Resolution of the National Commission for Regulation of Economic Competition. No. 310 of March 14. 2018.
5. Blinov I.V., Parus E.V., Polishuk E.Y., Zhuravlov I.V. Monitoring of overhead power lines using fault indicators. *Elektroenergeticheskie sistemy i seti*. 2013. No 4. Pp. 42–44. (Rus)

Надійшла: 05.10.2022

Прийнята: 07.11.2022

Submitted: 05.10.2022

Accepted: 07.11.2022