



ISSN 1607-7970  
E-ISSN 2218-1903

# ТЕХНІЧНА ЕЛЕКТРОДИНАМІКА

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ • ВІДДІЛЕННЯ ФІЗИКО-ТЕХНІЧНИХ ПРОБЛЕМ ЕНЕРГЕТИКИ

ТЕОРЕТИЧНА ЕЛЕКТРОТЕХНІКА  
ТА ЕЛЕКТРОФІЗИКА

ПЕРЕТВОРЕННЯ ПАРАМЕТРІВ  
ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНЕ  
ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ

ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ  
ТА УСТАНОВКИ

ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНІ СИСТЕМИ  
В ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЦІ

№4

2020

**РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ\*****EDITORIAL BOARD\***

<b>Кириленко О.В.,</b>	<b>головний редактор,</b>	<b>Kyrylenko O.V.,</b>	<b>Editor-in-Chief,</b>	Member	of
	академік НАН України		N.A.S.Ukraine		
<b>Шидловський А.К.,</b>	академік НАН України	<b>Shydlovskiy A.K.,</b>	Member of NAS Ukraine		
<b>Буткевич О.Ф.,</b>	<b>заступник головного редактора,</b>	<b>Butkevych O.F.,</b>	<b>Deputy Editor-in-Chief,</b>	Professor	
	професор				
<b>Волков І.В.,</b>	член-кор. НАН України	<b>Volkov I.V.,</b>	Corresponding Member of NAS Ukraine		
<b>Жаркін А.Ф.,</b>	член-кор. НАН України	<b>Zharkin A.F.,</b>	Corresponding Member of NAS Ukraine		
<b>Кенсицький О.Г.,</b>	д-р техн.наук	<b>Kensitskiy O.H.</b>	Dr.Sc. (Eng.)		
<b>Кондратенко І.П.,</b>	член-кор. НАН України	<b>Kondratenko I.P.,</b>	Corresponding Member of NAS Ukraine		
<b>Кузнецов В.Г.,</b>	член-кор. НАН України,	<b>Kuznetsov V.H.,</b>	Corresponding Member of NAS Ukraine		
<b>Липківський К.О.,</b>	<b>заступник головного редактора,</b>	<b>Lypkivskiy K.O.,</b>	<b>Deputy Editor-in-Chief,</b>	Professor	
	професор		Professor		
<b>Мазуренко Л.І.,</b>	професор	<b>Mazurenko L.I.,</b>	Professor		
<b>Мислович М.В.,</b>	професор	<b>Myslovych M.V.</b>	Professor		
<b>Михальський В.М.,</b>	член-кор. НАН України	<b>Mykhaskiy V.M.</b>	Corresponding Member of NAS Ukraine		
<b>Стогній Б.С.,</b>	академік НАН України	<b>Stohnii B.S.,</b>	Member of NAS Ukraine		
<b>Шаповал І.А.</b>	докт.техн.наук	<b>Shapoval I.A.</b>	Dr.Sc. (Eng.)		
<b>Шидловська Н.А.,</b>	член-кор. НАН України	<b>Shydlovska N.A.,</b>	Corresponding Member of NAS Ukraine		
<b>Щерба А.А.,</b>	член-кор. НАН України	<b>Shcherba A.A.,</b>	Corresponding Member of NAS Ukraine		
<b>Юрченко О.М.,</b>	д-р техн.наук	<b>Yurchenko O.M.,</b>	Dr.Sc. (Eng.)		
<b>Городжа Л.В.,</b>	<b>відповідальний секретар</b>	<b>Gorodzha L.V.,</b>	<b>Executive Managing Editor,</b>	Ph.D.	
	канд.техн.наук				

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

**INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD**

<b>Kyrylenko O.V.</b>	Member of NAS Ukraine, Institute of electrodynamics of NAS Ukraine, Kyiv
<b>Shydlovskiy A.K.</b>	Member of NAS Ukraine, Institute of electrodynamics of NAS Ukraine, Kyiv
<b>Hubanski S.</b>	Professor, Chalmers University of Technology, Sweden
<b>Zhuikov V.Ya.</b>	Professor, National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv
<b>Zagirnyak M.V.</b>	Professor, The Kremenchuk M.Ostrogradskiy National University, Ukraine
<b>Clare Jon C.</b>	Professor, The University of Nottingham, Great Britain
<b>Kulyk M.M.</b>	Member of NAS Ukraine, Institute of General Energy of NAS Ukraine, Kyiv
<b>Oleshchuk V.</b>	Professor, Institute of Power Engineering of AS Moldova, Kishinev
<b>Pavlik M.</b>	Member of NAS Ukraine, Technical University of Lodz, Poland
<b>Peresada S.M.</b>	Professor, National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv
<b>Pivniak H.H.</b>	Member of NAS Ukraine, National Mining University, Dnipropetrovsk, Ukraine
<b>Reztsov V.F.</b>	Corresponding Member of NAS Ukraine, Institute for Renewable Energy of NAS Ukraine, Kyiv
<b>Rozov V.Yu.</b>	Corresponding Member of NAS Ukraine, State Institution "Institute of Technical Problems of Magnetism of the NAS Ukraine, Kharkiv
<b>Rossi K.</b>	Professor, The University of Bologna, Italy
<b>Sokol Ye.I.</b>	Corresponding Member of NAS Ukraine, National Technical University "Kharkiv Polytechnical Institute", Ukraine, Kharkiv
<b>Stakhiv P.H.</b>	Professor, National University "Lviv Polytechnica", Ukraine, Lviv
<b>Harytonov S.O.</b>	Professor, Novosibirsk State Technical University, Russia

Журнал "Технічна електродинаміка" включено до Переліку наукових фахових видань України категорія «А», представлений у загальнодержавній реферативній базі даних "УКРАЇНІКА НАУКОВА", РЕФЕРАТИВНОМУ ЖУРНАЛІ ВІНІТИ РАН (Росія) та у міжнародних наукометричних базах даних SCOPUS, COMPENDEX, ELIBRARY, EBSCO, PROQUEST.

**Адреса редакції:**

03057, м. Київ, проспект Перемоги, 56, Інститут електродинаміки НАН України.  
 Тел. (044) 366 26 57. Email: [ted@icd.org.ua](mailto:ted@icd.org.ua) <http://www.techned.org.ua>

## ЗМІСТ

**Теоретична електротехніка та електрофізика**

МИХАЙЛОВ В.М. Розрахунок профілів соленоїдів для отримання сильних імпульсних магнітних полів із заданим розподілом на осі .....	5
ВАСЕЦЬКИЙ Ю.М., КОНДРАТЕНКО І.П. Електромагнітне поле індукторів для локального електроімпульсного впливу на металеві вироби .....	11
SUPRUNOVSKA N.I., SHCHERBA M.A., PERETYATKO Yu.V., ROZISKULOV S.S. Decrease of transients duration and improvement of dynamic characteristics of electrical discharge installations by changing the structure of their discharge circuit.....	15
БАТИГІН Ю.В., ШИНДЕРУК С.О., ЧАПЛИГІН Є.О., ЄРЬОМІНА О.Ф. Електромагнітні процеси в плоскій круговій системі з індуктором між тонкими котушками біфіляра .....	19
KUZNETSOV B.I., NIKITINA T.B., BOVDUI I.V. Active shielding of magnetic field of overhead power line with phase conductors of triangle arrangement.....	25

**Перетворення параметрів електричної енергії**

МИСАК Т.В., МИХАЛЬСЬКИЙ В.М. Формування компенсаційного струму трифазного паралельного активного фільтра за допомогою різнотемпових ковзних режимів .....	29
---	----

**Електромеханічне перетворення енергії**

ПЕРЕСАДА С.М., НІКОНЕНКО Є.О., ЖЕЛІНСЬКИЙ М.М., РЕШЕТНИК В.С. Формування динамічних режимів повністю керованого гібридного джерела живлення електричних транспортних засобів.....	35
ТОЛОЧКО О.І., КАЛУГІН Д.В. Оптимізація процесів намагнічування та розмагнічування векторно-керованого асинхронного двигуна.....	41

**Електроенергетичні системи та установки**

БУТКЕВИЧ О.Ф., ЮНСЄВА Н.Т., ГУРСЄВА Т.М., СТЕЦЮК П.І. Задача розташування накопичувачів електроенергії в ОЕС України з урахуванням його впливу на потоки потужності контрольованими перетинами .....	46
--	----

ЧИЖЕНКО О.І., ПОПОВИЧ О.М., ТРАЧ І.В., РИБІНА О.Б. Використання поняття коефіцієнту потужності задля оцінки ефективності пристроїв коригування перехідних режимів мережі.....	51
SHAVELKIN A., SHVEDCHUKOVA I. Management of generation and redistribution electric power in grid-tied photovoltaic system of local object.....	55
ГОВОРОВ П.П., НОВСЬКИЙ В.О., ГОВОРОВ В.П., КІНДІНОВА А.К. Керування режимами розподільних електромереж міст в умовах слабкої кореляції графіків активної та реактивної потужності.....	60
НОЕВЕНААРС А.Н., LAVRENIUK A.V., ПЕНТЕГОВ І.В., РИМАР С.В., СИДОРЕЦЬ В.М. Зниження додаткових втрат в обмотках силових реакторів .....	67
ІВАНОВ Г.А., БЛІНОВ І.В., ПАРУС Є.В., МІРОШНИК В.О. Складові моделі для аналізу впливу відновлюваних джерел енергії на ринкову вартість електроенергії в Україні .....	72
ЯМНЕНКО Ю.С., ТЕРЕЩЕНКО Т.О., ФЕДІН І.С., КЛЕПАЧ Л.Є. Вплив якості електроенергії на економічні характеристики ізолюваних MicroGrid .....	76

### **Інформаційно-вимірювальні системи в електроенергетиці**

СОНГ ВЕНГУАНГ, АНДРУЩАК В.С., КАЙДАН М.В., БЕШЛЕЙ М.І., КОЧАН О.В., СУ ЦЗЮНЬ Методика розрахунку енергоспоживання в інформаційно-комунікаційних системах .....	80
--	----

### **Ювіляри**

ДО 70-РІЧЧЯ члена-кореспондента НАН України Щерби А.А.....	89
ДО 85-РІЧЧЯ доктора технічних наук Барського В.О.....	91

**CONTENTS**

**Theoretical electrical engineering and electrophysics**

MIKHAILOV V.M. Calculation of profiles of solenoids for generation of high pulse magnetic fields with given distribution on axis.....5  
VASETSKY Yu.M., KONDRATENKO I.P. Electromagnetic field of the inductor for local electric pulse effects on metal products ..... 11  
SUPRUNOVSKA N.I., SHCHERBA M.A., PERETYATKO Yu.V., ROZISKULOV S.S. Decrease of transients duration and improvement of dynamic characteristics of electrical discharge installations by changing the structure of their discharge circuit..... 15  
BATYGIN Yu.V., SHINDERUK S.O., CHAPLYGIN E.O., YERYOMINA O.F. Electromagnetic processes in a flat circular system with an inductor between thin bifilar coils ..... 19  
KUZNETSOV B.I., NIKITINA T.B., BOVDUI I.V. Active shielding of magnetic field of overhead power line with phase conductors of triangle arrangement.....25

**Conversion of electric energy parameters**

MYSAK T.V., MYKHALSKYI V.M. Formation of the compensating current of a three-phase shunt active power filter using multiple-rate sliding modes ..... 29

**Electromechanical energy conversion**

PERESADA S., NIKONENKO Ye., ZHELINSKYI M., RESHETNYK V. Formation of dynamic modes of full-controlled hybrid energy storage system for electric vehicles .....35  
TOLOCHKO O.I., KALUHIN D.V. Optimization of magnetization and demagnetization processes of the vector controlled asynchronous motor .....41

**Electric power systems and installations**

BUTKEVYCH O.F., YUNIEIEVA N.T., HURIEIEVA T.M., STETSYUK P.I. The problem of electric power storages' placement in the ips of ukraine taking into account its influence on the power flows transmitted by controlled cutsets.....46  
CHYZHENKO O.I., POPOVYCH O.M., TRACH I.V., RYBINA O.B. Using the concept of power factor for estimating the devices efficiency for correction of networks transitional modes.....51  
SHAVELKIN A., SHVEDCHYKOVA I. Management of generation and redistribution electric power in grid-tied photovoltaic system of local object.....55

GOVOROV P.P., NOVSKIY V.O., GOVOROV V.P., KINDINOVA A.K. Management of modes of distributive electric networks of cities under conditions of weak correlation of graphics of active and reactive power.....	60
HOEVENAARS A.H., LAVRENIUK A.V., PENTEGOV I.V., RYMAR S.V., SYDORETS V.M. Reducing additional losses in power reactor windings .....	67
IVANOV H.A., BLINOV I.V., PARUS E.V., MIROSHNYK V.O. Components of model for analysis of influence of renewables on the electricity market price in Ukraine .....	72
YAMNENKO Y.S., TERESHCHENKO T.O., FEDIN I.S., KLEPACH L.E. The influence of electrical energy quality to economic characteristics of isolated MicroGrid.....	76

### **Information-measuring systems in power engineering**

SONG WENGUANG, ANDRUSHCHAK V.S., KAIDAN M.V., BESHLEY M.I., KOCHAN O.V., SU JUN Methodology for calculating the energy consumption of information communication systems .....	80
---	----

### **Anniversaries**

TO THE 70 <sup>TH</sup> ANNIVERSARY of corresponding member of NAS Ukraine A.A.Shcherba .....	89
TO THE 85 <sup>TH</sup> ANNIVERSARY V.O.Barskyi.....	91

Науковий редактор К.О. ЛИПКІВСЬКИЙ  
Редактор І.О.БРАГІНЕЦЬ

---

Друкується згідно з рекомендацією Вченої ради Інституту електродинаміки НАН України, протокол № 5 від 26.06.2020 р. Включено до Переліку наукових фахових видань України 24.05.2018, категорія «А».  
Підписано до друку 06.07.2020. Формат 60x84/8. Пап. друк. офс. Офсет. Ум.-друк. арк. 11,3.  
Тираж 200 прим. Зам. 24. Зареєстровано 20.01.94. Свідоцтво: серія КВ, № 388. Ціна договірна.

---

Поліграфічна дільниця Інституту електродинаміки НАН України, 03057, м. Київ, пр. Перемоги, 56.

## РОЗРАХУНОК ПРОФІЛІВ СОЛЕНОЇДІВ ДЛЯ ОТРИМАННЯ СИЛЬНИХ ІМПУЛЬСНИХ МАГНІТНИХ ПОЛІВ ІЗ ЗАДАНИМ РОЗПОДІЛОМ НА ОСІ

**В.М. Михайлов**, докт. техн. наук

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,

вул. Кирпичова, 2, Харків, 61002, Україна,

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

*Сформульовано задачу продовження плоскомеридіанного магнітного поля з осі симетрії відносно магнітного потоку та скалярного потенціалу магнітного поля. Аналітичні розв'язки цієї задачі отримано двома методами: методом часткових розв'язків, безперервно залежних від параметра, і за допомогою функції Гріна для магнітного потоку. В першому методі використано інтегральне перетворення Фур'є заданих на осі розподілів індукції магнітного поля. Другий метод побудований на функції Гріна для магнітного потоку кільцевого струму в необмеженому, немагнітному та непровідному просторі. Доведено, що така функція за певної умови є розв'язком задачі продовження магнітного потоку з осі симетрії. Показано застосування систем співвісних кільцевих струмів і функції Гріна, що містить повні еліптичні інтеграли, для розрахунку різних розподілів індукції імпульсного магнітного поля на осі симетрії та відповідних їм профілів масивних одновиткових соленоїдів. Досліджено вплив величини, напрямку, радіусів та розташування вздовж осі цих струмів на розподіл індукції. Отримано інтегральні перетворення Фур'є деяких функцій, що розширює можливості першого методу розв'язання задачі. Бібл. 8, рис. 4.*

**Ключові слова:** імпульсне магнітне поле, профіль одновиткового соленоїда, задача продовження поля, функція Гріна, інтегральне перетворення Фур'є.

**Вступ.** У фізичних експериментах виникає потреба отримання сильних імпульсних магнітних полів за допомогою масивних одновиткових соленоїдів, що представляють собою тіла обертання із радіальним розрізом для струмопідводу [1, 2]. Профілі таких соленоїдів можуть бути визначені розв'язком задачі продовження плоскомеридіанного магнітного поля за заданим розподілом індукції на осі симетрії. Ідея та загальний розв'язок рівняння для скалярного потенціалу такої задачі, отриманий із використанням інтегральних перетворень Фур'є, є у монографії [2]. Проте відсутність в описі задачі граничних умов на осі симетрії ускладнює визначення функції параметру інтегрального перетворення, що входить в інтеграл розв'язку, та функцію потоку, яка потрібна для побудови силових ліній поля, що продовжується.

**Мета роботи** – опис та аналіз математичних формулювань задачі продовження плоскомеридіанного магнітного поля з осі симетрії за допомогою магнітного потоку і скалярного потенціалу та отримання нових аналітичних розв'язків стосовно визначення профілів масивних одновиткових соленоїдів.

**Формулювання та розв'язання задачі відносно магнітного потоку.** Нехай у циліндричних координатах  $r$ ,  $\psi$ ,  $z$  з осі симетрії  $z$ , на котрій задана осьова проекція індукції магнітного поля  $\vec{B}$ , необхідно продовжити плоскомеридіанне магнітне поле у необмежений, непровідний і немагнітний простір без джерел. Приймаємо допущення квазістаціонарності, а проникненням поля у провідники пристроїв, для котрих будуть використані результати, нехтуємо. Ці допущення дають змогу не враховувати залежність шуканих функцій від часу. Із визначення векторного потенціалу магнітного поля  $\vec{A}$  [3] маємо

$$\Phi(r, z) = 2\pi r A_{\psi}(r, z), \quad B_z(r, z) = -\frac{1}{2\pi r} \frac{\partial \Phi}{\partial r}, \quad (1, 2)$$

де  $\Phi(r, z)$  – магнітний потік, що проходить через кільце радіусу  $r$ ;  $A_\psi(r, z)$  – єдина ненульова азимутальна проекція  $\vec{A}$ ;  $B_z(r, z)$  – осьова проекція  $\vec{B}$ .

До формулювання задачі входить рівняння

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 \quad (3)$$

та граничні умови на осі симетрії

$$\Phi(0, z) = 0, \quad \left. \frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial r} \right|_{r=0} = 2\pi B_z(0, z). \quad (4, 5)$$

Рівняння (3) отримано із першого рівняння електромагнітного поля [3], а потім перетворено з урахуванням (1). Гранична умова (4) виходить з (1) та вимоги обмеженості  $A_\psi(0, z)$ , а в умові (5)  $B_z(0, z)$  – задана індукція на осі  $z$ .

Для розв'язання задачі (3) – (5) використовуємо метод часткових розв'язків, безперервно залежних від параметру  $\lambda$  [4]. Опускаючи викладки, маємо

$$\Phi(r, z) = 2\sqrt{2\pi r} \int_0^\infty I_1(\lambda r) \frac{1}{\lambda} f(\lambda) d\lambda. \quad (6)$$

Функція  $f(\lambda)$  дорівнює  $f_1(\lambda) = F_c(\lambda) \cos(\lambda z)$  або  $f_2(\lambda) = F_s(\lambda) \sin(\lambda z)$  відповідно для парних або непарних розподілів  $B_z(0, z)$  ( $F_c(\lambda)$ ,  $F_s(\lambda)$  – косинус- та синус-перетворення Фур'є  $B_z(0, z)$  [4]).

Бачимо, що для визначення магнітного потоку не треба попередньо розв'язувати задачу для скалярного потенціалу [2].

**Формулювання та розв'язання задачі для скалярного потенціалу магнітного поля.** Скалярний потенціал  $\varphi_m(r, z)$  магнітного поля, що продовжується, введемо за допомогою співвідношення  $\vec{B} = -\mu_0 \text{grad } \varphi_m$ , звідки виходять формули ( $\mu_0$  – магнітна стала)

$$B_r(r, z) = -\mu_0 \frac{\partial \varphi_m}{\partial r}, \quad B_z(r, z) = -\mu_0 \frac{\partial \varphi_m}{\partial z}. \quad (7, 8)$$

Класичне формулювання задачі продовження поля для скалярного потенціалу (задача Коші [5]) має складатися із рівняння Лапласа

$$\frac{\partial^2 \varphi_m}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi_m}{\partial r} + \frac{\partial^2 \varphi_m}{\partial z^2} = 0 \quad (9)$$

та граничних умов на осі симетрії

$$\varphi_m(0, z) = f_1(z), \quad \left. \frac{\partial \varphi_m}{\partial r} \right|_{r=0} = f_2(z), \quad (10, 11)$$

де  $f_1(z)$  і  $f_2(z)$  – задані функції.

У випадку, що розглядається, функція  $f_1(z)$  невідома, тому замість (10) використовуємо граничну умову

$$\left. \frac{\partial \varphi_m}{\partial z} \right|_{r=0} = -\frac{1}{\mu_0} B_z(0, z), \quad (12)$$

що містить інформацію щодо заданого розподілу індукції магнітного поля.

Оскільки на осі симетрії поля, що продовжується,  $B_r(0, z) = 0$ , то згідно з (7) гранична умова (11) приймає вигляд

$$\left. \frac{\partial \varphi_m}{\partial r} \right|_{r=0} = 0. \quad (13)$$

Описане формулювання задачі відрізняється від класичного граничною умовою (12). Використовуючи той же метод, що і для визначення  $\Phi(r, z)$ , отримуємо розв'язок задачі (9), (12) і (13)

$$\varphi_m(r, z) = \frac{1}{\mu_0} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^\infty I_0(\lambda r) \frac{1}{\lambda} f(\lambda) d\lambda. \quad (14)$$

У розв'язках (14) і (6)  $I_0(\lambda r)$ ,  $I_1(\lambda r)$  – модифіковані функції Бесселя першого роду нульового та першого порядку. У формулі (14)  $f(\lambda)$  дорівнює  $-f_2(\lambda)$  або  $f_1(\lambda)$  для парного або непарного розподілу  $B_z(0, z)$ . Правильність розв'язків (6) і (14) підтверджено визначенням магнітного потоку, що проходить через кільце радіусу  $r$  з центром на осі  $z$ , за допомогою формули (8) і рішення (14). Зауважимо



також, що не визначена в монографії [2] функція параметру інтегрального перетворення дорівнює  $\frac{1}{\lambda} \sqrt{\frac{2}{\pi}} f(\lambda)$ , де  $f(\lambda)$  дорівнює  $f_1(\lambda)$  або  $t$ ,  $f_2(\lambda)$  відповідно для парного або непарного скалярного потенціалу, що узгоджується з розв'язком (14).

**Використання функцій Гріна.** Функція Гріна для векторного потенціалу плоскомеридіанного магнітного поля  $\vec{G}_A$ , що утворюється нескінченно тонким кільцем з одиничним струмом в необмеженому, непровідному і немагнітному просторі, має задовольняти рівнянню (усюди, окрім точок кільця) і граничній умові

$$\text{rot rot } \vec{G}_A = 0, \quad \vec{G}_A \Big|_{r=0} = 0, \quad (15, 16)$$

а також прямує до нуля на нескінченності.

Це визначення відрізняється від відомого [6] граничною умовою (16). Функція  $\vec{G}_A$  може бути виділена у відомих формулах для векторного потенціалу плоскомеридіанного магнітного поля кільцевого струму  $I$  за допомогою співвідношень

$$\vec{A} = I \vec{G}_A, \quad \vec{G}_A = \vec{A} \Big|_{I=1}. \quad (17)$$

Оскільки вектори  $\vec{A}$  і  $\vec{G}_A$  мають тільки по одній проекції, то подібні (17) співвідношення справедливі і для їхніх модулів  $A$  і  $G_A$ . Крім цього, у відповідності з (1), функція Гріна для магнітного потоку

$$G_\Phi(r, z) = 2\pi r G_A(r, z), \quad G_\Phi(r, z) = \Phi(r, z) \Big|_{I=1}. \quad (18, 19)$$

*Доведемо наступне твердження:* функція Гріна  $G_\Phi(r, z)$  є розв'язком задачі (3) – (5) за умови, що заданий розподіл індукції співпадає з розподілом індукції на осі кільцевого одиничного струму.

Для доведення використаємо відому формулу для векторного потенціалу магнітного поля, що утворюється кільцем радіуса  $r_M$  із струмом  $I$  і центром в точці  $z_M=0$ , за  $r < r_M$  [7], а також формулою (1). Отримуємо

$$\Phi(r, z) = 2\mu_0 r_M r I \int_0^\infty I_1(kr) K_1(kr_M) \cos(kz) dk, \quad (20)$$

де  $K_1(kr_M)$  – модифікована функція Бесселя другого роду першого порядку;  $k$  – параметр.

Очевидно, що магнітний потік (20), а отже, і відповідна йому згідно (19) функція Гріна  $G_\Phi(r, z)$  задовольняє рівнянню (3) і граничній умові (4). За допомогою формул (2), (20) визначаємо індукцію магнітного поля на осі кільцевого струму

$$B_z(0, z) = \frac{\mu_0 r_M I}{\pi} \int_0^\infty K_1(kr_M) k \cos(kz) dk. \quad (21)$$

Отримаємо розв'язок задачі (3) – (5) з урахуванням формули (21) у граничній умові (5). Для цього спочатку, вважаючи  $k = \lambda$ , з (21) знаходимо косинус-перетворення Фур'є  $B_z(0, z)$

$$F_c(\lambda) = \frac{\mu_0 r_M I}{\sqrt{2\pi}} \lambda K_1(\lambda r_M). \quad (22)$$

Після підстановки (22) в розв'язок (6) приходимо до формули (20), яка за  $I=1$  є функцією Гріна  $G_\Phi(r, z)$ . *Твердження доведено.* Вочевидь, воно справедливо і у разі розташування центру кільцевого струму в деякій точці  $z=z_M$ .

**Розрахунки полів, що продовжуються, для деяких заданих розподілів індукції.** Використовуючи відомі найбільш прості формули для розрахунку  $A(r, z)$  і  $B_z(0, z)$ , що містять повні еліптичні інтеграли [7], маємо розв'язок задачі (3) – (5)

$$\Phi(r, z) = \mu_0 I \sqrt{rr_M} \left[ \left( \frac{2}{k} - k \right) K(k) - \frac{2}{k} E(k) \right], \quad (23)$$

а також відповідний йому розподіл індукції

$$B_z(0, z) = \frac{1}{2} \mu_0 r_M^2 I \sqrt{r_M^2 + (z - z_M)^2}^{-3/2}, \quad (24)$$

де  $K(k)$ ,  $E(k)$  – повні еліптичні інтеграли першого та другого роду модуля  $k$

$$k = 2 \sqrt{\frac{r r_M}{(r + r_M)^2 + (z - z_M)^2}}$$

В силу лінійності задачі (3) – (5) її розв’язком є і сума магнітних потоків

$$\Phi(r, z) = \sum_{k=1}^{k=n} \Phi_k(r, z), \quad (25)$$

що утворюються системою  $n$  співвісних кільцевих струмів  $I_k$ ,  $k = \overline{1, n}$ , розташованих вздовж осі  $z$ , за умови, що заданий розподіл індукції співпадає з розподілом індукції магнітного поля на осі цієї системи струмів

$$B_z(0, z) = \frac{1}{2} \mu_0 \sum_{k=1}^{k=n} \frac{\pm I_k r_{Mk}^2}{[r_{Mk}^2 + (z - z_{Mk})^2]^{3/2}}, \quad (26)$$

де  $\Phi_k(r, z)$ ,  $r_{Mk}$ ,  $z_{Mk}$  – магнітний потік, радіус і осьова координата центра  $k$ -го кільцевого струму.

У формулі (25) кожний доданок визначається за формулою (23), де треба прийняти  $I = \pm I_k$ ,  $r_M = r_{Mk}$ ,  $z_M = z_{Mk}$ . Струми  $I_k$  є алгебраїчними величинами: знак плюс мають струми, що співпадають за напрямом із ортом  $\vec{I}_\psi$ , мінус – струми протилежного напрямку.

У найпростішому випадку двох однакових за величиною та радіусом кільцевих струмів, симетрично розташованих відносно точки  $z=0$  ( $n=2$ ,  $r_{M1}=r_{M2}=r_M$ ,  $z_{M1}=z_M$ ,  $z_{M2}=-z_M$ ), формула (26) приймає вигляд

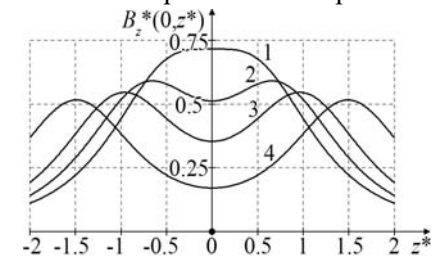
$$B_z(0, z) = \frac{1}{2} \mu_0 I r_M^2 \left[ (r_M^2 + (z - z_M)^2)^{-3/2} \pm (r_M^2 + (z + z_M)^2)^{-3/2} \right]. \quad (27)$$

Знаки плюс або мінус між доданками у квадратних дужках відповідають струмам однакового напрямку та парному або струмам протилежних напрямів та непарному розподілам  $B_z(0, z)$ . Використовуючи перший метод розв’язку задачі для магнітного потоку та відому формулу для векторного потенціалу  $\vec{A}$  кільцевого струму з модифікованими функціями Бесселя [7], знаходимо косинус- і синус-перетворення Фур’є функцій у квадратних дужках формули (27)

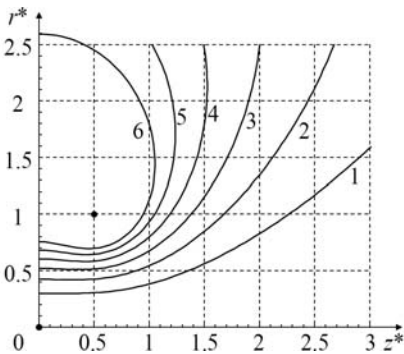
$$\left. \begin{aligned} F_c(\lambda) \\ F_s(\lambda) \end{aligned} \right\} = \frac{2}{r_M} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \lambda K_1(\lambda r_M) \left\{ \begin{aligned} \cos(\lambda z_M) \\ \sin(\lambda z_M) \end{aligned} \right\}. \quad (28)$$

З (28) при  $z_M=0$  після поділу на 2 отримуємо  $F_c(\lambda)$  функції  $(r_M^2 + z^2)^{-3/2}$ . Зауважимо, що отримані перетворення Фур’є відсутні у довіднику [8].

На рис. 1 – 4 зображено розподіли індукції магнітного поля на осі симетрії і силові лінії магнітного поля  $\Phi = \text{const}$ , що розраховані за формулами (25) для  $n=2$ , (27) за зміни радіусів, положення, величини та напрямку кільцевих струмів. Величини, позначені зірочками, є безрозмірними та визначені поділом відповідних розмірних величин

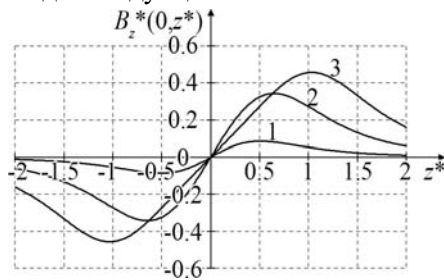


а



б

Рис. 1

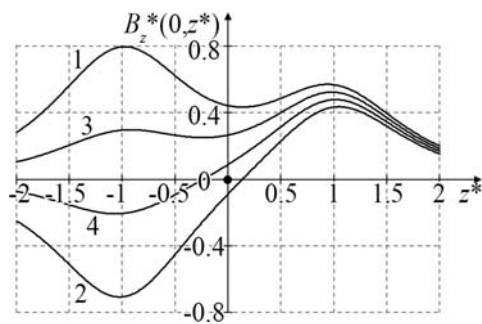


б

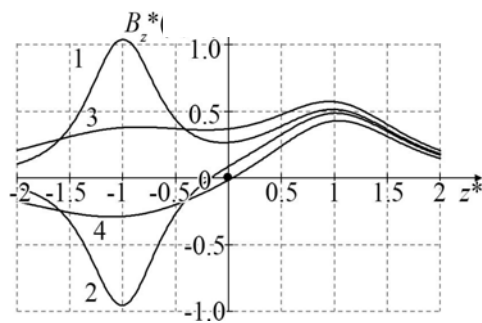
Рис. 2

на базисну довжину  $l_6$ , струм  $I_6$ , індукцію  $B_6$ , і магнітний потік  $\Phi_6$  ( $B_6 = \mu_0 I_6 / l_6$ ,  $\Phi_6 = \mu_0 I_6 l_6$ ). На рис. 1, а і 2, а показані парні та непарні розподіли індукції за  $r_M^* = 1$  і різних  $z_M^*$ : на рис. 1, а для кривих 1-4  $z_M^* = 0.5; 0.75; 1.0; 1.5$ ; на рис. 2, а – для кривих 1-3  $z_M^* = 0.1; 0.5; 1.0$ . Зменшення відстані між кільцевими струмами однакового напрямку призводить до

збільшення індукції в середній частині розподілу (рис. 1, а), а у випадку струмів протилежного на-

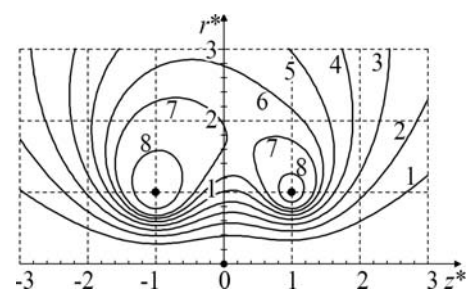


а

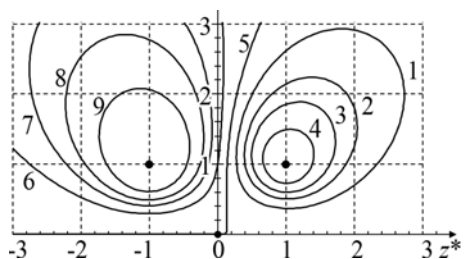


б

Рис. 3



а



б

Рис. 4

прямую – до зменшення її амплітудних значень (рис. 2, а). На рис 1, б і 2, б наведено симетричні відносно осі  $r^*$  силові лінії за  $z_{M1}^*=z_{M2}^*=0.5$  для парного (для ліній 1-6  $\Phi^*=0.2-1.2$  з кроком 0.2) та непарного (для ліній 1-6  $\Phi^*=0.1-0.6$  з кроком 0.1) розподілів індукції (жирними точками на рис.1, б; 2, б і 4 показано розташування кільцевих струмів). Парний розподіл забезпечується одним соленоїдом, а непарний – двома із струмами протилежного напрямку, профілі яких обмежені зображеними силовими лініями. Зауважимо також, що парний розподіл і силові лінії, що зображено на рис. 1, а (крива 1) і б, відповідають відомим кільцям Гельмгольца.

Зміною величин і напрямів струмів, що протікають в симетричній ( $r_{M1}^*=r_{M2}^*=1$ ;  $I_1^*=1$ ; рис. 3, а для кривої 1  $I_2^*=1.5$ ; 2 –  $-1.5$ ; 3 –  $0.5$ ; 4 –  $-0.5$ ), а також в несиметричній ( $r_{M1}^*=1$ ;  $I_1^*=1$ ; рис. 3, б, для кривих 1,2 –  $r_{M2}^*=0.5$ ; 3,4 –  $1.5$ ; для кривих 1,3  $I_2^*=1$ ; 1,3 –  $-1$ ) системах двох кільцевих струмів (формула (26),  $n=2$ ,  $z_{M1}^*=z_{M2}^*=1$ ) отримуємо різні розподіли індукції, які не є парними або непарними та можуть представляти інтерес для експериментів із плазмою [1]. На рис. 4, а показано силові лінії магнітного поля, відповідні на рис. 3, а кривій 1 (для ліній 1-7  $\Phi^*=0.2-1.4$  з кроком 0.2; 8 –  $2.0$ ) і кривій 2 (для ліній 1-9  $\Phi^*=0.2$ ;  $0.4$ ;  $0.6$ ;  $1.0$ ;  $0$ ;  $-0.2$ ;  $-0.4$ ;  $-0.6$ ;  $-1.0$ ).

**Висновки.** Функція Гріна магнітного потоку кільцевого струму в необмеженому, немагнітному і непровідному просторі, а також сума добутків величин струмів на таку функцію, що відповідає сукупності співвісних кільцевих струмів, є розв'язками задачі продовження плоскомеридіанного магнітного поля з осі симетрії, якщо заданий розподіл індукції співпадає з розподілом індукції на осі кільцевого струму або сукупності таких струмів. Радіуси, координати центрів, величини, напрями та число кільцевих струмів є параметрами розподілу індукції магнітного поля на осі симетрії, змінюючи котрі можна отримати заданий розподіл, а потім за допомогою розв'язків задачі продовження поля розрахувати силові лінії та визначити профілі одного або двох масивних одновиткових соленоїдів.

1. Дашук П.Н., Зайснц С.Л., Комельков В.С., Кучинской Г.С., Николаевская Н.Н., Шкуропат П.И., Шнеерсон Г.А. Техника больших импульсных токов и магнитных полей. М.: Атомиздат, 1970. 472 с.
2. Шнеерсон Г.А. Поля и переходные процессы в аппаратуре сверхсильных токов. М.: Энергоатомиздат, 1992. 416 с.
3. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники. Т. 2. Л.: Энергоиздат, 1981. 416 с.
4. Лебедев Н.Н., Скальская И.П., Уфлянд Я.С. Сборник задач по математической физике. М.: ГИТТЛ, 1955. 420 с.
5. Лаврентьев М.М. О некоторых некорректных задачах математической физики. Новосибирск, 1962. 352 с.
6. Михайлов В.М. Функції Гріна плоскомеридіанних електричних та магнітних полів над плоскою граничною поверхнею. *Технічна електродинаміка*. 2018. № 4. С. 5-9.  
DOI: <https://doi.org/10.15407/techmed2018.04.005>
7. Смайт В. Електростатика и электродинамика. М.: ИЛ, 1954. 604 с.
8. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. М.: Наука, 1986. 544 с.

УДК 621.3

## РАСЧЕТ ПРОФИЛЕЙ СОЛЕНОИДОВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ СИЛЬНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ С ЗАДАННЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ НА ОСИ

В.М. Михайлов\*, докт. техн. наук

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»,

ул. Кирпичева, 2, Харьков, 61002, Украина,

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

*Приведены математические формулировки задачи продолжения плоскомеридианного магнитного поля с оси симметрии относительно магнитного потока и скалярного потенциала магнитного поля. Аналитические решения этой задачи получены двумя методами: методом частных решений, непрерывно зависящих от параметра, и при помощи функции Грина для магнитного потока. В первом методе использованы интегральные преобразования Фурье заданных на оси распределений индукции магнитного поля. Второй метод основан на функции Грина для магнитного потока кольцевого тока в неограниченном немагнитном и непроводящем пространстве. Доказано, что такая функция при определенном условии является решением задачи продолжения магнитного потока с оси симметрии. Показано применение системы соосных кольцевых токов и функции Грина, содержащей полные эллиптические интегралы, для расчета различных распределений индукции импульсного магнитного поля на оси симметрии и соответствующих им профилей массивных одновитковых соленоидов. Исследовано влияние величины и направления, радиусов и положения вдоль оси этих токов на распределение индукции. Получены интегральные преобразования Фурье некоторых функций, расширяющие возможности первого метода решения задачи. Библ. 8, рис. 4.*

**Ключевые слова:** импульсное магнитное поле, профиль одновиткового соленоида, задача продолжения поля, функция Грина, интегральное преобразование Фурье.

## CALCULATION OF PROFILES OF SOLENOIDS FOR GENERATION OF HIGH PULSE MAGNETIC FIELDS WITH GIVEN DISTRIBUTION ON AXIS

V.M. Mikhailov

National technical university «Kharkiv polytechnic institute»,

2, Kyrpychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine,

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

*Mathematical formulations of magnetic field continuation from axis of symmetry for magnetic flux and scalar magnetic potential are described. Analytical solutions of the problem are obtained by two methods. The first method is based on partial solutions, which depend on parameter continuously, and Fourier's transformations of given magnetic induction distributions on the axis. In the second method Green's function for magnetic flux of annular current in unlimited non-conducting and nonmagnetic space is used. It is proved, that this function is solution of magnetic flux continuation from axis of symmetry under certain condition. The application of coaxial annular currents and Green's function, which contains complete elliptic integrals, for calculation of different pulse magnetic induction distributions on axis of symmetry and corresponding profiles of massive single-turn solenoids is shown. Influence of value and direction, radiuses and location of these currents on magnetic induction distribution is investigated. Integral Fourier's transformations for some function are founded that extend scope for application of the first method problem solution.*

References 8, figures 4.

**Keywords:** pulse magnetic field, profile of single-turn solenoid, field continuation problem, Green's function, Fourier's integral transformation.

1. Dashuk P.N., Zaients S.L., Komelkov V.S., Kuchinskoi G.S., Nikolaevskaia N.N., Shkuropat P.I., Shneerson G.A. High pulse current and magnetic field technique. Moskva: Atomizdat, 1970. 472 p. (Rus)
2. Shneerson G.A. Fields and transients in the equipment of superpower currents. Moskva: Energoatomizdat, 1992. 416 p. (Rus)
3. Neiman L.R., Demirchian K.S. Theoretical fundamentals of electrical engineering. Vol 2. Leningrad: Energoizdat, 1982. 416 p. (Rus)
4. Lebedev N.N., Skalskaia I.P., Ufliand Ia.S. Compilation of mathematical physics problems. Moskva: GITTL, 1955. 420 p. (Rus)
5. Lavrentev M.M. About certain incorrect problems of mathematical physics. Novosibirsk, 1962. 352 p. (Rus)
6. Mikhailov V.M. Green's functions of axisymmetric electric and magnetic fields above flat boundary surface. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2018. No 4. Pp. 5-9. (Ukr)
7. Smit V. Electrostatics and Electrodynamics. Moskva: Inostrannaia Literatura, 1954. 604 p. (Rus)
8. Bronshtein I.N., Semendiaev K.A. Handbook of mathematics for engineers and students of technical universities. Moskva: Nauka, 1986. 544 p. (Rus)

Надійшла 28.02.2020

Остаточний варіант 12.05.2020

## ЕЛЕКТРОМАГНІТНЕ ПОЛЕ ІНДУКТОРІВ ДЛЯ ЛОКАЛЬНОГО ЕЛЕКТРОІМПУЛЬСНОГО ВПЛИВУ НА МЕТАЛЕВІ ВИРОБИ

Ю.М. Васецький\*, докт. техн. наук, І.П. Кондратенко\*\*, чл.-кор. НАН України  
Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна, e-mail: [yuriy.vasetsky@gmail.com](mailto:yuriy.vasetsky@gmail.com)

*Розроблено математичну модель по визначенню густини імпульсного індукваного струму в електропровідному листі і параметрів струму контура індуктора для безконтактної електроімпульсної обробки матеріалів. На основі розрахункових даних показано перспективність використання індукторів у вигляді контурів зі струмом задля впливу на зварний шов внаслідок прояву ефекту «електропластичності» в локальній області. Бібл. 7, рис. 5.*

**Ключові слова:** тривимірне електромагнітне поле, імпульсний струм, сильний скін-ефект, зварний шов.

**Вступ.** Проведені останнім часом наукові та експериментальні дослідження показали, що обробка металевих матеріалів, зокрема зварних швів, імпульсним електричним струмом (ІЕС) та імпульсним електромагнітним полем (ІЕМП) позитивно впливає на зниження напружено-деформованих станів металевих конструкцій [1]. Обробка металевих виробів ІЕМП, що створює в металі магнітний тиск, який наближається до межі плинності матеріалу, сприяє зниженню рівнів напружених станів та підвищує пластичність металу [2]. Разом з тим засобом впливу на механічні властивості матеріалу зварного шва є ефект «електропластичності», який має місце за умови, що густина струму в металі є не меншою певного значення, яке, наприклад, для алюмінієвих сплавів досягає  $10^9$  А/м<sup>2</sup>. Збудження вихрового струму в алюмінієвих сплавах задля досягнення умов прояву ефекту «електропластичності» потребують значно менших амплітудних значень струму індуктора, ніж задля досягнення магнітного тиску близького до межі плинності. Це свідчить про доцільність про-ведення досліджень в напрямку використання для обробки зварних швів ефекту «електропластичності» та розробки відповідних інструментів задля забезпечення необхідних значень густини струмів в металі.

Одним з перспективних способів забезпечення протікання в металі струму значної густини є безконтактний індукційний спосіб введення енергії в метал. При цьому напруженість індукваного електричного поля і, відповідно, густини струмів пропорційні швидкості зміни поля у часі [3]. Це обумовлює застосування швидкоплинного імпульсного електромагнітного поля, для якого має місце сильний скін-ефект, коли поле і струм існують в тонкому поверхневому шарі металевого листа [4].

Досягти введення імпульсного струму в металевий лист можна кількома шляхами. В [5] досліджено можливість застосування індуктора з Ш-подібним феромагнітним осердям та багатовитковою обмоткою. Така система дає змогу зменшити необхідну амплітуду струму джерела живлення. Разом з цим використання обмотки з декількома витками та відносно велика робоча площа індуктора значно збільшують індуктивність системи, що є несприятливим фактором для імпульсного пристрою. Найпростішим конструктивним виконанням індуктора є одновитковий струмовий контур. Така конфігурація дозволяє забезпечити локальний вплив імпульсного поля на ділянці невеликої площині, зменшити індуктивність системи і, тим самим, забезпечити менш жорсткі вимоги до джерела імпульсного струму.

Метою роботи є дослідження розподілу густини імпульсного індукваного струму в електропровідному листі та визначення необхідних параметрів імпульсу струму контуру індуктора задля реалізації в металі «електропластичного» ефекту.

**Математична модель.** В [6] отримано аналітичний розв'язок загальної задачі визначення електромагнітного поля, що формується в системі, яка містить довільний контур зі струмом і пласке електропровідне тіло. Наведено вирази для комплексних амплітуд напруженостей електричного і магнітного полів в двох областях: діелектричній  $\vec{E}_e$  і  $\vec{H}_e$ , де розташований контур  $l$  зі струмом  $\dot{I}_0$ , та в електропровідній  $\vec{E}_i$  і  $\vec{H}_i$  з питомою електропровідністю  $\gamma$  і відносною магнітною проникністю

$\mu$ . В електропровідній області протікає індукований струм з густиною  $\mathbf{j}_i = \gamma \dot{\mathbf{E}}_i$ . Розв'язок для комплексних амплітуд дає частотний спектр напруженостей полів у разі заданого частотного спектра  $\dot{I}_0(i\omega)$  імпульсного струму  $I_0(t)$ .

Перехід від виразів для частотного спектру до залежностей полів від часу здійснюється за допомогою оберненого перетворення Фур'є. В результаті вирази для напруженості електричного поля набувають вигляду

$$\mathbf{E}_e(t) = -\frac{\mu_0}{4\pi l} \oint \left[ \left( \frac{\mathbf{t}}{r} - \frac{\mathbf{t}_1}{r_1} \right) \frac{\partial I_0(t)}{\partial t} - \mathbf{e}_z \times [\mathbf{t}_1 \times \nabla V_e(t)] \right] dl, \quad \mathbf{E}_i(t) = -\frac{\mu_0}{4\pi l} \oint \left[ (\mathbf{t} - \mathbf{e}_z (\mathbf{t} \cdot \mathbf{e}_z)) V_{i0}(t) + (\mathbf{t} \cdot \mathbf{e}_z) \mathbf{e}_\rho V_{i1}(t) \right] dl. \quad (1)$$

Тут застосовано локальну циліндричну систему координат: вісь  $z$  спрямована в напрямку одиничного вектору  $\mathbf{e}_z$ , перпендикулярного до поверхні поділу середовищ, і проходить через точку витоку на контурі  $l$ ; радіальна координата  $\rho$  відраховується від вертикальної вісі в напрямку одиничного вектору  $\mathbf{e}_\rho$ ;  $r$  і  $r_1$  – відстані між точкою спостереження та точкою витоку  $M$  на вихідному контурі і точкою  $M_1$  на дзеркально відбитому від поверхні контурі;  $\mathbf{t}$  і  $\mathbf{t}_1$  – відповідні одиничні дотичні вектори до контурів. Функції  $V_e(t)$ ,  $V_{i0}(t)$  і  $V_{i1}(t)$  є результатом застосування оберненого перетворення Фур'є і визначаються наступним чином:

$$V_e(t) = \frac{4}{\pi_0} \int_0^\infty \cos \omega t \operatorname{Re} \left[ i\omega \dot{I}_0 \int_0^\infty \frac{e^{-(z-z_{M1})\vartheta} J_0(\vartheta \rho)}{w(\vartheta)} d\vartheta \right] d\omega, \quad V_{i0,1}(t) = \frac{4}{\pi_0} \int_0^\infty \cos \omega t \operatorname{Re} \left[ i\omega \dot{I}_0 \int_0^\infty \frac{e^{q_i z - \vartheta z_M} J_{0,1}(\vartheta \rho)}{w(\vartheta)} \vartheta d\vartheta \right] d\omega, \quad (2)$$

де  $q_i = \sqrt{\vartheta^2 + i\omega \mu_0 \mu \gamma}$ ;  $w(\vartheta) = \vartheta + q_i/\mu$ ;  $J_k(\cdot)$  – функція Бесселя першого роду порядку  $k$ .

Наведені формули є аналітичним розв'язком у вигляді інтегральних співвідношень для розрахунку напруженості електричного поля. Разом з тим розв'язок у вигляді потрійного невластного інтеграла передбачає досить велику кількість обчислень. Спрощення може бути реалізовано з використанням асимптотичного розкладання виразів по параметру  $\varepsilon_1 = \mu \delta / (\sqrt{2} r_1) = \mu / (r_1 \sqrt{\omega \mu_0 \mu \gamma})$ , якій є малим у випадку сильного скін-ефекту, що має місце для імпульсного поля у разі застосування безконтактного електроімпульсного методу впливу на електропровідне середовище.

В результаті напруженість електричного поля в діелектричному середовищі набуває вигляду обмеженого асимптотичного ряду, у кожному члені якого залежності за часом і координатах розраховуються окремо за виразами, обчислення яких добре розроблено і не викликає труднощів

$$V_e(t) = \sum_{n=0}^N V_{en}(t) = \sum_{n=0}^N \frac{g_n(\mu, \gamma, r_1)}{2\Gamma((n+1)/2)} \int_0^t \left. \frac{dI_0(\zeta)}{d\zeta} \right|_{\zeta=t-\tau} \tau^{(n-1)/2} d\tau, \quad (3)$$

де  $g_n(\mu, \gamma, r_1) = (-1)^n 2a_n(\mu) \left( \frac{\mu}{\sqrt{\mu_0 \mu \gamma}} \right)^{n+1} \frac{\partial^{(n)}}{\partial z^n} \left( \frac{1}{r_1} \right)$ ,  $a_n(\mu)$  – коефіцієнти розкладання в ряд функції  $1/w(\vartheta)$ .

**Результати розрахунків.** Для конкретних розрахунків обрано систему (рис. 1), для якої максимум густини індукованого струму локалізується поблизу точки, найбільш наближеної до поверхні металевго листа. Розрахунки поля проведено із застосуванням точного і наближеного методів розрахунку тривимірного електромагнітного поля для імпульсу струму кругового контуру радіуса  $R$ , що розташований в площині, перпендикулярній до межі поділу середовищ. Геометричні розміри нормовано на відстань від центру кругового контуру до площини  $H = R + h_0$ , де  $h_0$  – найменша відстань від контуру до площини.

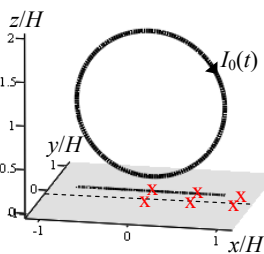


Рис. 1

Залежність струму від часу визначається таким виразом

$$I(t) = I_m [\exp(-\alpha_1 t) - \exp(-\alpha_2 t)]. \quad (4)$$

Вибір цієї залежності обумовлено формою імпульсу струму реальних джерел, які використовуються в пристроях електродинамічної обробки зварних швів. У них фронт імпульсу, який визначає максимальні значення густини індукованого струму, досить добре описується виразом (4) при  $\alpha_2 = 2\alpha_1$ . В цьому випадку максимальна величина струму є  $I_{\max} = I_m/4$ . Конкретні значення  $\alpha_1$  і  $\alpha_2$  оцінимо із умови затухання індукованого струму в електропровідному

листі товщиною  $D$ . Визначимо тривалість фронту імпульсу як досягнення максимального значення  $\tau_\phi = t_{\max} = \ln(\alpha_2/\alpha_1)/(\alpha_2 - \alpha_1)$ . Тоді із оцінки характерної частоти  $f_\phi = 1/\tau_\phi$  умову затухання поля у цьому листі  $D$  можна представити як  $D = k_d \delta = k_d \sqrt{\tau_\phi / (\pi \mu_0 \gamma)}$ , де достатньо вибрати  $k_d = 3$ . За  $D = 3 \cdot 10^{-3}$  м і  $\alpha_2/\alpha_1 = 2$  для алюмінієвого листа ( $\gamma = 3,7 \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$ ) отримуємо оцінку необхідної тривалості фронту  $\tau_\phi = D^2 \pi \mu_0 \gamma / k_d^2 \approx 1,5 \cdot 10^{-4}$  с і коефіцієнти затухання  $\alpha_1 = \alpha_2/2 = \ln 2 / \tau_\phi \approx 1/\tau_\phi = 6,67 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ .

Задля отримання конкретних результатів затухання поля розраховано залежності густини струму на різній глибині безпосередньо під круговим контуром зі струмом радіусом  $R = 5 \cdot 10^{-2}$  м і

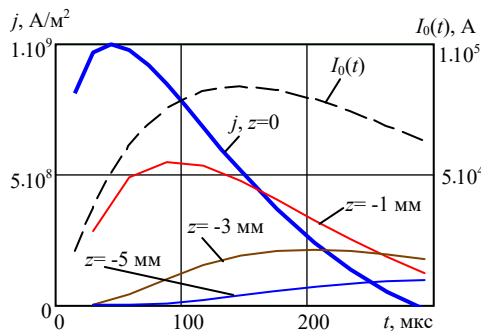


Рис. 2

відстані  $h_0 = 10^{-2}$  м (рис. 2). Амплітуда імпульсу струму контуру обрана такої величини, щоб густина струму на поверхні листа складала  $10^9 \text{ А/м}^2$ , тобто значення, за яким має місце ефект «електропластичності». Представлені дані свідчать, що за обраних значень постійних затухання для листів з товщиною  $D \geq 3 - 5$  мм достатньо застосовувати модель електропровідного півпростору.

Тривимірне електромагнітне поле для індуктора у вигляді кругового струмового контуру є неоднорідним полем, яке зменшується по всім напрямкам вздовж площині листа відносно точки, найближчої до контуру. Така особливість ілюструється розрахунками залежності густини струму від часу в точках на поверхні алюмінієвого листа, положення яких на рис. 1 показано хрестиками. З точки зору використання ефекту «електропластичності» результати щодо розподілу поля можуть виявитися корисними задля визначення меж області, в якій відбуваються ці зміни, а також дослідження впливу на розміри області з меншою густиною струмів. Відповідні залежності наведено на рис. 3 за  $y=0$  і на рис. 4 –  $y=0,6$  см. В останньому випадку вектор густини струму має компоненту, перпендикулярну до площини контуру, і тому показано залежність модуля вектора.

За обраними геометрією системи і параметрами імпульсу амплітуда струму контура має досить високе значення  $I_{\max} = 83,8 \cdot 10^3 \text{ А}$ . Зменшити її можна зменшивши відстань  $h_0$ . На рис. 5 наведено залежності за зменшеній вдвічі відстані до поверхні  $h_0 = 0,5 \cdot 10^{-2}$  м.

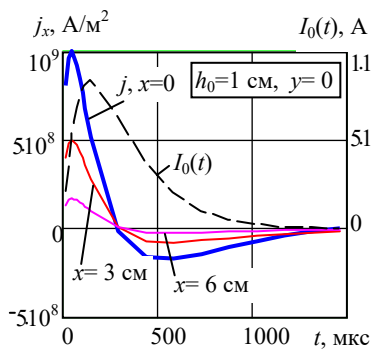


Рис. 3

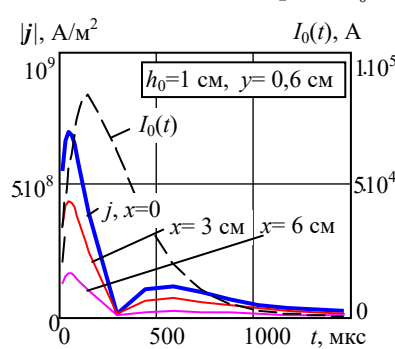


Рис. 4

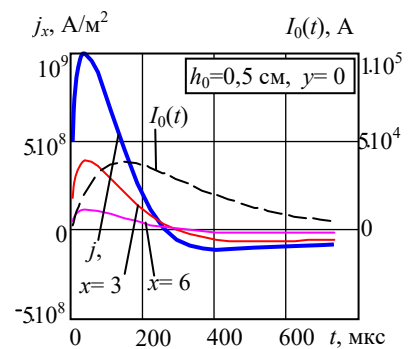


Рис. 5

Видно, що в цьому випадку більш ніж удвічі зменшується необхідна амплітуда імпульсу струму контуру, яка тепер становить  $I_{\max} = 38,7 \cdot 10^3 \text{ А}$ . Разом з цим зменшується і розмір області з підвищеною густиною струму. Крім того, зменшення відстані  $h_0$  обмежено розмірами перерізу провідника, які залежать не тільки від величини струму, а й інших факторів, наприклад, частоти імпульсів. Зазначимо, що необхідна для прояву ефекту «електропластичності» величина густини струму в металі може бути досягнута не тільки за рахунок амплітудного значення імпульсу струму джерела, а й швидкості його зростання на фронті імпульсу [7].

Таким чином, із наведених результатів можна зробити **висновок**, що індукційний метод введення імпульсного струму в метал з використанням індукторів у вигляді контурів зі струмом може розглядатися як перспективний спосіб впливу на зварний шов в локальній області завдяки ефекту

«электропластичности». Розробка методу пов'язана із забезпеченням необхідних параметрів імпульсу струму джерела з врахуванням конфігурації контуру індуктора і його взаємодії з електропровідним середовищем. В цьому випадку задача має комплексний характер з її формулюванням як задачі оптимізації електромагнітної системи.

*Роботу виконано за цільовою програмою наукових досліджень НАН України «Надійність і довговічність матеріалів, конструкцій, обладнання та споруд» (Ресурс-2) (КПКВК 6541030).*

1. Степанов Г.В., Бабуцкий А.И. Влияние импульсного электрического тока высокой плотности на прочность металлических материалов и напряженно-деформированное состояние элементов конструкций. К.: Наукова думка, 2014. 276 с.
2. Лобанов Л.М., Пашин Н.А., Логинов В.П., Покляцкий А.Т. Влияние электроимпульсной обработки на остаточное формирование тонколистовой сварочной конструкции. Автоматическая сварка. 2010. № 3. С. 13-17.
3. Поливанов К.М. Теоретические основы электротехники. М.: Энергия, 1969. 352 с.
4. Михайлов В.М. Импульсные электромагнитные поля. Х.: Вища школа, 1979. 139 с.
5. Ращепкін А.П., Кондратенко І.П., Карлов О.М., Кришук Р.С. Электромагнітне поле індуктора з Ш-подібним осердям для магнітно-імпульсної обробки матеріалів. *Технічна електродинаміка*. 2019. № 6. С. 5-12.  
DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.06.005>
6. Vasetsky Yu.M, Dziuba K.K. Three-Dimensional Quasi-Stationary Electromagnetic Field Generated by Arbitrary Current Contour Near Conducting Body. *Технічна електродинаміка*. 2018. № 1. С. 3-12.  
DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.01.003>
7. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. М.: Мир, 1972. 392 с.

УДК 620.179:621.373.5 УДК 621.3.011

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ ИНДУКТОРА ДЛЯ ЛОКАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ИЗДЕЛИЯ

**Ю.М. Васецкий**, докт. техн. наук, **И.П. Кондратенко**, чл.-кор. НАН Украины

**Институт электродинамики НАН Украины,**

**пр. Перемоги, 56, Киев, 03057, Украина,**

**e-mail: [yuriy.vasetsky@gmail.com](mailto:yuriy.vasetsky@gmail.com)**

*Разработана математическая модель по определению плотности импульсного индуцированного тока в электропроводном листе и параметров тока контура индуктора для бесконтактной электроимпульсной обработки материалов. На основе расчетных данных показана перспективность использования индукторов в виде контуров с током для воздействия на сварной шов вследствие проявления эффекта «электропластичности» в локальной области. Библ. 7, рис. 5.*

**Ключевые слова:** трехмерное электромагнитное поле, импульсный электрический ток, сильный скин-эффект, сварной шов.

## ELECTROMAGNETIC FIELD OF THE INDUCTOR FOR LOCAL ELECTRIC PULSE EFFECTS ON METAL PRODUCTS

**Yu.M. Vasetsky, I.P. Kondratenko**

**Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,**

**Peremohy ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine,**

**e-mail: [yuriy.vasetsky@gmail.com](mailto:yuriy.vasetsky@gmail.com)**

*The mathematical model has been developed to determine of the induced pulsed density current in the conductive sheet and the current parameters of the inductor contour for non-contact electric pulse processing of materials. Based on the calculated data, the prospects of using inductors in the form of current contours for influencing the weld due to the "electroplasticity" effect in the local area are shown. References 7, figures 5.*

**Keywords:** three-dimensional electromagnetic field, pulsed electric current, strong skin effect, weld.

1. Stepanov G.V., Babutskiy A.I. Effect of high-density pulsed electric current on strength of metallic materials and stress-strain state of structural components. Kyiv: Naukova dumka, 2010. 276 p. (Rus)
2. Lobanov L.M., Paschin N.A., Loginov V.P., Poklyatskiy A.T. Impact of electric pulse processing on the residual formation of a thin-sheet welding structure. *Avtomaticheskaya svarka*. 2010. No 3. Pp. 13-17. (Rus)
3. Polivanov K.M. Theoretical bases of electrical engineers. Moskva: Energiya, 1969. 352 p. (Rus)
4. Mikhaylov V.M. Pulsed electromagnetic fields. Kharkov: Vischa shkola, 1979. 139 p. (Rus)
5. Rashchepkin A.P., Kondratenko I.P., Karlov O.M., Kryshchuk R.S. Electromagnetic field of w-shaped inductor for magnetic-pulse processing of materials. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2019. No 6. Pp. 5-12. (Ukr)  
DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.06.005>
6. Vasetsky Yu.M, Dziuba K.K. Three-Dimensional Quasi-Stationary Electromagnetic Field Generated by Arbitrary Current Contour Near Conducting Body. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2018. No 1. Pp. 3-12.  
DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.01.003>
7. Knopfel G. Pulsed High Magnetic Fields. Moskva: Mir, 1972. 392 p. (Rus)

Надійшла 28.02.2020

Остаточний варіант 07.04.2020



## DECREASE OF TRANSIENTS DURATION AND IMPROVEMENT OF DYNAMIC CHARACTERISTICS OF ELECTRICAL DISCHARGE INSTALLATIONS BY CHANGING THE STRUCTURE OF THEIR DISCHARGE CIRCUIT

N.I. Suprunovska<sup>1\*</sup>, M.A. Shcherba<sup>2\*\*</sup>, Yu.V. Peretyatko<sup>2\*\*\*</sup>, S.S. Roziskulov<sup>1\*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup> Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,  
pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine, e-mail: [iednat1@gmail.com](mailto:iednat1@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 features of changing the duration and nature of transients in electric-discharge installations (EDIs) when shunting the discharge circuit of their capacitor with an additional RL-circuit instead of by regulating the voltage feedbacks are determined. The dependences of pulsed currents and powers in the load of such installations when changing their structure are studied. Based on the mathematical simulation, the appropriate values of the time delay of connecting an additional shunt RL-circuit after the start of the capacitor discharge through the load and the energy-efficient parameters of the additional circuit are determined. The use of obtained results allows to reduce in practice the duration of the pulse currents and increase the pulse power in the load, that is, to increase the output dynamic characteristics of the EDI. In spark technology, this approach contributes to the production of electro-eroded powders with smaller sizes and better performance. References 12, figures 5, tables 2.*

**Keywords:** transient, capacitor, discharge, pulse current, duration, power.

Changes in the duration of transients and dynamic characteristics in the output circuits of electric-discharge installations (EDIs) for spark erosion [1-3], electro-hydraulic [4] and induction [5] treatments of materials are usually investigated taking into account changes in their output voltage [4, 6], discharge parameters pulses [2, 7] and electrical resistance of the load [8]. However, connecting the shunt RL-circuit in parallel to the capacitor of the EDI at a certain moment of its discharge can prevent the occurrence of undesirable long aperiodic currents in the load, which significantly reduce the efficiency of the EDI and increase the particle size of the obtained powder [9-12]. Therefore, it is important to investigate the peculiarities of changing the parameters of impulse currents in the EDI under different conditions of shunting of the discharge circuit of their capacitor.

**The aim of the work** is to determine the conditions for changing the structure of the output circuit of the EDI, which reduce the duration of the pulse currents in the load and increase the output dynamic characteristics.

In the circuit diagram of discharge circuit of EDI for spark erosion shown in Fig. 1, the discharge of the reservoir capacitor  $C$  to the load resistance  $R_{load}$  is carried out through the inductive resistance and active one of the discharge circuit ( $L_1, R_1$ ) after locking the semiconductor (thyristor) switch  $VT_1$ . The bypass  $R_2L_2$ -circuit was connected in parallel to the capacitor by switching on the thyristor switch  $VT_2$  after start of the capacitor discharge some time later.

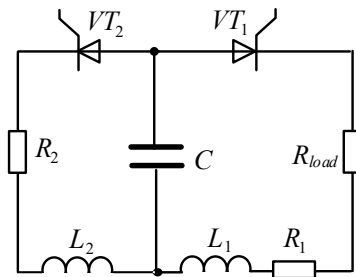


Fig. 1

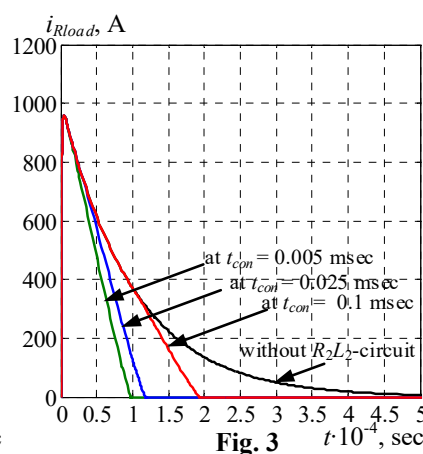
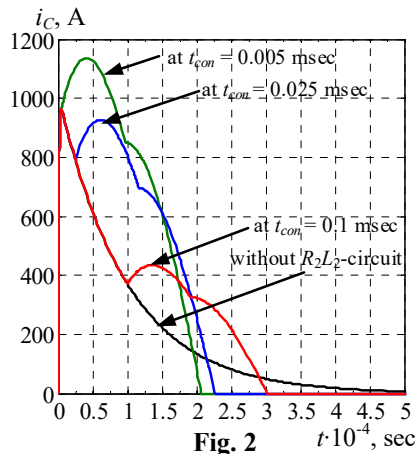
The calculations on mathematical models and the analysis of pulse currents in the load of experimental EDI showed that the change in their dynamic characteristics significantly depends on the duration of the pause between switching on  $VT_1$  and  $VT_2$ . For simulation the transients we used software packages MathLab Simulink. The parameters of the discharge circuit elements were chosen so that on the one hand they correspond to the real parameters of discharge circuit of experimental EDIs with electro-spark load [2, 5, 8, 12], in which  $C = 10^{-4}$  F,  $R_1 \approx 0.001$  Ohm,  $L_1 \approx 10^{-6}$  H and on the other hand, that the discharge transient has an aperiodic nature due to increasing the load resistance to  $R_{load} \geq 1$  Ohm. Initial voltage on capacitor was 1000 V. The bypass circuit parameters were chosen so that the aperiodic discharge of the capacitor was guaranteed to be transformed into an oscillatory one after turning on the thyristor  $VT_2$  ( $R_2 = 0.001$  Ohm and  $L_2 = 5 \cdot 10^{-5}$  H).

The results of the studies are shown in Fig. 2, Fig. 3 and in Table 1. The  $i_C$  currents in the capacitor and  $i_{R_{load}}$  currents in the load that occur during the aperiodic discharge transient without connecting the by-

pass  $R_2L_2$ -circuit and after switching on the  $VT_2$  thyristor after pauses equal to 0.005; 0.025 and 0.1 msec are shown in Fig. 2 and Fig. 3 correspondingly.

Table 1 reflects the change in obtained characteristics of the discharge transient (such as maximum currents in the capacitor  $I_{Cmax}$ , in the load  $I_{Rloadmax}$ , and in  $R_2L_2$ -circuit  $I_{R2L2max}$ ; the recharge capacitor voltage  $U_{Crech}$ ; discharge duration in the load  $\tau$ ; energy and average pulse power in the load:  $W_{load}$  and  $P_{loadav}$ ; capacitor energy utilization factor  $k_C$ ) when the connection moment of the  $R_2L_2$ -circuit  $t_{con}$  changes. The average pulse power in the load was calculated as  $P_{loadav} = W_{load}/\tau$ , and  $k_C$  – by the formula  $k_C = W_{load}/W_{C0}$ , where  $W_{C0}$  is the energy in the capacitor at the beginning moment of the discharge transient ( $W_{C0} = CU_{C0}^2/2 = 50$  J).

Analysis of the results in Fig. 2, Fig. 3 and in Table 1 confirms that the moment of connection of the bypass circuit significantly affects the nature of the discharge transient. It proceeds the faster the earlier the bypass circuit is connected. So connecting the bypass circuit at time  $t_{con} = 0.005$  msec (0.025 and 0.1 msec)



reduces the discharge time by 7.2 (6 and 3.6) times, respectively, compared to the mode without connecting. In this case, the average pulse power in the load increases 4.6 (4.5 and 3.5) times, respectively.

It should be noted that the maximum load currents in all considered modes do not change ( $I_{Rloadmax} = 960$  A). The capacitor energy utilization factor  $k_C$  becomes the greater, the later the bypass circuit is connected. So, at

$t_{con} = 0.025$  (0.1 msec), compared to  $t_{con} = 0.005$  msec, the  $k_C$  value increases by 1.2 (1.5) times. This is explained by the fact that the later the

circuit is connected, the greater part of the accumulated energy is already dissipated in the load and the smaller part of it will be used to recharge the capacitor to the reverse voltage.

The most technologically and energy-efficient discharge mode for electro-spark load in EDIs with reservoir capacitors (in particular in semiconductor installations for volumetric spark dispersion of current-conducting materials) is the oscillatory discharge of capacitor with its recharge up to

30% of the initial voltage [6, 7]. Based on this, it is advisable to connect the bypass circuit at the time  $t_{con} = 0.1$  msec. In this case, the discharge time will be reduced by 3.6 times (compared to the mode without circuit connection), the capacitor recharge voltage will be approximately 23% of its initial voltage (modulo), and the load energy  $W_{load}$  will be 1.5 (1.2) times greater than at  $t_{con} = 0.005$  (0.025) msec, respectively.

The pulse power in the load will be slightly less than with an earlier connection of the bypass circuit, but the capacitor energy utilization factor will be 1.5 (1.2) times higher.

However, if the main purpose of the dispersion process is to minimize the size of the obtained spark eroded powders, then in this case it would be advisable to connect the bypass circuit as early as possible ( $t_{con} = 0.005$  msec), since in many papers the proportional relationship between the discharge duration and the size of the particles is proved.

Another factor influencing the nature of the capacitor discharge transients to the load is the values of the inductance and the active resistance of the connected bypass circuit.

Active resistance  $R_2$  is the active resistance of the connecting wires and the wires wound on the coil of this circuit. The resistance  $R_2$  is two orders of magnitude lower than the load resistance ( $R_2 \approx 0.001$  Ohm,  $R_{load} \geq 1$  Ohm). That is why a change in  $R_2$  several times with a change in the inductance  $L_2$  by an order of

**Table 1**

Characteristics of the discharge transient	Conditions of $R_2L_2$ -circuit connection ( $R_2 = 0.001$ Ohm, $L_2 = 5 \cdot 10^{-5}$ H): $t_{con}$ , msec			
	0.005·msec	0.025 msec	0.1·msec	$\infty$ msec (no connection)
$I_{Cmax}$ , A	1135	963	963	960
$I_{Rloadmax}$ , A	960	960	960	960
$I_{R2L2max}$ , A	852	696	326	0
$U_{Crech}$ , V	-599	-489	-228	0
$\tau$ , msec	0.10	0.12	0.20	0.72
$W_{load}$ , J	31.6	37.6	47.0	49.7
$P_{loadav}$ , kJ/sec	323	321	246	71
$k_C$ , r.u.	0.63	0.75	0.94	0.99

magnitude or more did not actually affect the course of the discharge process. Therefore, we assumed that  $R_2$  is constant when the inductance  $L_2$  is changed.

We studied the transients of capacitor discharge to the load, depending on the magnitude of the bypass inductance  $L_2$ . The parameters of the elements of the discharge circuit except  $L_2$  were chosen the same as in the previous study. The connection moment of the bypass circuit was accepted  $t_{con} = 0.1$  msec. Transitions were investigated at three different values of inductance  $L_2$ : 100; 50; 5  $\mu\text{H}$ . The results of the study are shown in Fig. 4, Fig. 5 and in Table 2 (similar to Table 1). Fig. 4 and 5 show the capacitor currents and the load ones, respectively, during the aperiodic discharge process without connecting the bypass circuit and with connecting this circuit at different values of its inductance  $L_2$ : 5; 50; 100  $\mu\text{H}$ .

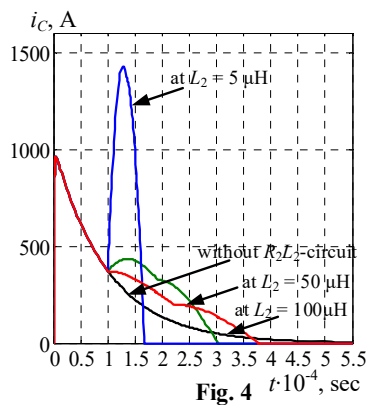


Fig. 4

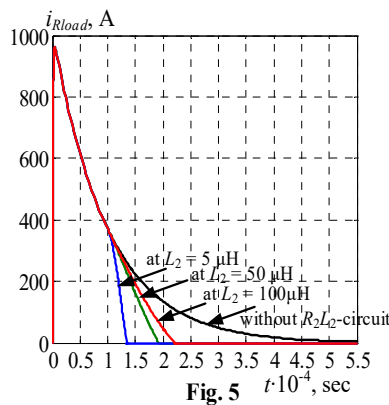


Fig. 5

Analysis Fig. 4, Fig. 5 and Table 2 shows that the maximum current in bypass circuit increases with decreasing the inductance in this circuit. Thus, at  $L_2 = 5 \mu\text{H}$ , the discharge current in the capacitor has two maxima (the second maximum is caused by an increase in the current in the bypass circuit up to  $I_{R_2L_2 \max}$ , which is 43% greater than the maximum current in load  $I_{R_{load \max}}$ ).

That is why further reduction of  $L_2$ , which will lead to an even greater increase in the maximum current in the bypass circuit and therefore in the capacitor, is impractical because of the limited capabilities of semiconductor switches.

With regard to the energy released in the load, with a change in  $L_2$  from 100 to 50 (5) mH, it decreases by only 1.5 (5.9)%. In this case, the discharge duration in the load decreases more significantly: by 14 (41)%, respectively, which leads to an increase in the average pulse power in the load by 14 (59)%.

In all cases considered, the reverse recharge voltage of the capacitor practically does not exceed 30% of its initial voltage (the condition for the most effective discharge mode to the spark load), and the capacitor energy utilization factors are high ( $k_C \geq 0.9$ ). Thus, the most appropriate choice is the inductance  $L_2 = 50 \mu\text{H}$ , at which the maximum current in the circuit does not exceed 35% of the maximum currents in the capacitor and in the load with sufficiently high other transient characteristics.

**Conclusions.** Simulation and analysis of transients in the discharge circuit of a semiconductor electric-discharge installation with a spark load showed that using the additional  $RL$ -circuit in parallel to the capacitor of the installation, we can convert a long aperiodic discharge of the capacitor into a rapidly decaying oscillatory one, in which the load current increases and its duration decreases. It is substantiated that the main factors influencing such changes are the moment of connection and the inductance value of the additional  $RL$ -circuit. In this paper, the expedient moments of connecting such a circuit and the value of its inductance are determined for the parameters of the discharge circuit of actually operating installations for electro-spark dispersion of a layer of metal granules in liquids during the formation of charging voltages up to 1000 V.

The work was performed at the expense of scientific work "Creation of scientific and technical bases of intellectualization of technological processes and means of measurement, control, monitoring and diagnostics in electric power and electrotechnical systems (code: INTEHEN)" within the target program of scientific researches "Fundamental Research on Energy Transformation and Utilization Processes" under the Budget Program "Supporting the Development of Priority Areas of Research" (code of programmatic classification of expenditures 6541230).

1. Liu Y., Li X., Li Y., Zhao Zh., Bai F. The lattice distortion of nickel particles generated by spark discharge in hydrocarbon dielectric mediums. *Applied Physics A*. 2016. Vol. 122. Pp. 174-1 – 174-9. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00339-016-9698-2>.  
 2. Shcherba A.A., Suprunovska N.I., Shcherba M.A. Transient analysis in circuits of electric discharge installations with voltage feedback taking into account the recovery time of locking properties their semiconductor switches. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2018. No 3. Pp. 43–47. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.03.043>.

**Table 2**

Characteristics of the discharge transient	Inductance $L_2$ of bypass circuit, $\mu\text{H}$		
	100	50	5
$I_{C \max}$ , A	963	963	1428
$I_{R_{load \max}}$ , A	961	961	961
$I_{R_2L_2 \max}$ , A	199	326	1375
$U_{C \text{ rech}}$ , V	-196	-227	-303
$\tau$ , msec	0.22	0.19	0.13
$W_{load}$ , J	47.7	47.0	44.9
$P_{load \text{ av}}$ , kJ/sec	217	247	345
$k_C$ , r.u.	0.95	0.94	0.90

ISSN 1607-7970. Техн. електродинаміка. 2020. № 4

3. Casanueva R., Azcondo F.J., Branäs C., Bracho S. Analysis, design and experimental results of a high frequency power supply for spark erosion. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2005. Vol. 20. Pp. 361–369. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2004.842992>.
4. Shcherba A.A., Kosenkov V.M., Bychkov V.M. Mathematical closed model of electric and magnetic fields in the discharge chamber of an electrohydraulic installation. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2015. Vol. 51 (6). Pp. 581–588.
5. Shcherba A.A., Podoltsev A.D., Kucheriava I.M., Ushakov V.I. Computer modeling of electrothermal processes and thermomechanical stress at induction heating of moving copper ingots. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2013. No 2. Pp. 10–18. (Rus)
6. Shydlovskaya N.A., Zakharchenko S.N., Cherkasskyi A.P. Non-linear-parametrical Model of Electrical Resistance of Conductive Granulated Media for a Wide Range of Applied Voltage. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2014. No 6. Pp. 3–17. (Rus)
7. Shydlovskaya N.A., Zakharchenko S.N., Cherkasskyi A.P. The Analysis of Electromagnetic Processes in Output Circuit of the Generator of Discharge Pulses <https://doi.org/10.1063/1.4764017> with Non-linear Model of Plasma-erosive Load at Change Their Parameters in Wide Ranges. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2016. No 1. Pp. 87–95. (Rus)  
DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.01.087>.
8. Ivashchenko D.S., Shcherba A.A., Suprunovska N.I. Analyzing Probabilistic Properties of Electrical Characteristics in the Circuits Containing Stochastic Load. IEEE International Conference on *Intelligent Energy and Power Systems IEPS-2016*. Kyiv, Ukraine, June 7–11, 2016. Pp. 45–48. DOI: 10.1109/IEPS.2016.7521887.
9. Nguyen P.K., Lee K.H., Kim S.I., Ahn K.A., Chen L.H., Lee S.M., Chen R.K., Jin S., Berkowitz A.E. Spark Erosion: a High Production Rate Method for Producing Bi<sub>0.5</sub>Sb<sub>1.5</sub>Te<sub>3</sub> Nanoparticles With Enhanced Thermoelectric Performance. *Nanotechnology*. 2012. Vol. 23. Pp. 415604-1 – 415604-7.
10. 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>.
11. 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>.
12. 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>

УДК 621.3.011

### **ЗМЕНШЕННЯ ТРИВАЛОСТІ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ І ПІДВИЩЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОРОЗРЯДНИХ УСТАНОВОК ЗМІНЕННЯМ СТРУКТУРИ ЇХНЬОГО РОЗРЯДНОГО КОЛА**

**Н.І. Супруновська<sup>1</sup>, докт. техн. наук, М.А. Щерба<sup>2</sup>, докт. техн. наук, Ю.В. Перетятко<sup>2</sup>, канд. техн. наук, С.С. Розискулов<sup>1</sup>**

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

e-mail: [iednat1@gmail.com](mailto:iednat1@gmail.com)

<sup>2</sup> НТУ України «КПІ ім. Ігоря Сікорського»,  
пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна

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

*Визначено особливості змінення тривалості та характеру перехідних процесів в електророзрядних установках (ЕРУ) у разі шунтування кола розряду їхнього конденсатора додатковим RL-ланцюгом, а не регулюванням зворотних зв'язків за напругою. Досліджено залежності імпульсних струмів та потужностей у навантаженні ЕРУ за зміненням їхньої структури. На основі математичного моделювання визначено доцільні значення затримки в часі підключення додаткового RL-ланцюга після початку розряду конденсатора на навантаження та енергоефективні параметри додаткового ланцюга. Використання отриманих результатів дає змогу зменшити на практиці тривалість імпульсних струмів та збільшити імпульсну потужність у навантаженні, тобто підвищити вихідні динамічні характеристики ЕРУ. В електроіскрових технологіях такий підхід сприяє отриманню електроерозійних порошків з меншими розмірами та кращими експлуатаційними характеристиками. Бібл. 12, рис. 5, табл. 2.*

**Ключові слова:** перехідний процес, конденсатор, розряд, імпульсний струм, тривалість, потужність.

### **УМЕНЬШЕНИЕ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ И ПОВЫШЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫХ УСТАНОВОК ИЗМЕНЕНИЕМ СТРУКТУРЫ ИХ РАЗРЯДНОЙ ЦЕПИ**

**Н.И. Супруновская<sup>1</sup>, докт. техн. наук, М.А. Щерба<sup>2</sup>, докт. техн. наук, Ю.В. Перетятко<sup>2</sup>, канд. техн. наук, С.С. Розискулов<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Институт электродинамики НАН Украины,  
пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина,

e-mail: [iednat1@gmail.com](mailto:iednat1@gmail.com)

<sup>2</sup> НТУ Украины "Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского"  
пр. Победы, 37, Киев, 03056, Украина,

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

*Определены особенности изменения длительности и характера переходных процессов в цепях электроразрядных установок (ЭРУ) при шунтировании цепи разряда их конденсатора дополнительной RL-цепочкой, а не регулированием обратных связей по напряжению. Исследованы зависимости импульсных токов и мощностей в нагрузке ЭРУ при изменении их структуры. На основе математического моделирования определены целесообразные значения временной задержки подключения дополнительной шунтирующей RL-цепи после начала разряда конденсатора на нагрузку и энергоэффективные параметры дополнительной цепи. Использование полученных результатов позволяет уменьшить на практике длительность импульсных токов и увеличить импульсную мощность в нагрузке, т.е. повысить выходные динамические характеристики ЭРУ. В электроискровых технологиях такой подход способствует получению электроэрозийных порошков с меньшими размерами и лучшими эксплуатационными характеристиками. Библ. 12, рис. 5, табл. 2.*

**Ключевые слова:** переходный процесс, конденсатор, разряд, импульсный ток, длительность, мощность.

Надійшла 28.02.2020

Остаточний варіант 16.04.2020

## ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ПРОЦЕСИ В ПЛОСКІЙ КРУГОВІЙ СИСТЕМІ З ІНДУКТОРОМ МІЖ ТОНКИМИ КОТУШКАМИ БІФІЛЯРА

Ю.В. Батигін\*, докт.техн.наук, С.О. Шиндерук\*\*, канд.техн.наук, Є.О. Чаплигін\*\*\*, канд.техн.наук,  
О.Ф. Єрємін\*\*\*\*, канд.техн.наук  
Харківський національний автомобільно-дорожній університет,  
вул. Ярослава Мудрого, 25, Харків, 61002, Україна,  
e-mail: [s.shinderuk.2016102@ukr.net](mailto:s.shinderuk.2016102@ukr.net)

*Проведено аналіз електромагнітних процесів, що протікають в індукторній системі з біфілярною котушкою, а також чисельні оцінки характеристик збуджених струмів в умовах високої інтенсивності діючих полів. Задля вивчення електромагнітних процесів в тонкостінних обмотках біфіляра, на відміну від їхніх масивних реалізацій, застосовується строгий математичний підхід із застосуванням методів теорії електромагнітного поля. Чисельні оцінки проведено за допомогою отриманих аналітичних залежностей. Показано, що амплітуда струму, індукованого в біфілярній обмотці експериментальної моделі розглянутої індукторної системи, у відношенні до струму збудження не перевищує 10-15%, що значно менше можливого максимуму ~ 50%. Відзначено, що радіальний розподіл індукованого струму у біфілярній обмотці, на відміну від рівномірного розподілу струму збудження в індукторі, має зростаючий характер від внутрішнього до зовнішнього радіусу біфілярної обмотки. Отримані результати дають змогу оцінити рівень ефективності щодо вибору конструктивних рішень для нових елементів обладнання в магнітно-імпульсній обробці металів. Бібл. 11, рис. 3.*

**Ключові слова:** котушка біфіляра, плоска кругова індукторна система, магнітно-імпульсна обробка металів, перетворення енергії, соленоїд-індуктор.

**Вступ.** Відмітною особливістю біфілярних електротехнічних конструкцій є наявність паралельних близько розташованих провідників. Залежно від призначення в них можуть протікати одно- або протилежно спрямовані струми. Фізичними наслідками їхньої різноспрямованості є можливість отримання нульового магнітного поля у внутрішній порожнині між провідниками або в просторі поза ними. Практичні застосування біфілярних котушок як конструктивних елементів електротехнічних пристроїв є досить різноманітними. Найбільш відомими серед них є малоіндуктивні омичні опори, запобіжні струмообмежувальні пристрої, електронні системи, сенсорні датчики у вимірювальних комплексах та ін. [1].

**Короткий огляд літератури.** Серед робіт, які присвячені розрахункам і аналізу електромагнітних процесів в електротехнічних пристроях з біфілярними котушками, можна виділити наукові видання [2, 3], де викладено постановки і вирішення найбільш поширених завдань прикладної електродинаміки в області сильних і надсильних електромагнітних полів. Причому, в [2] мова йде про розрахунки різноманітних котушок, що застосовуються у техніці плазмових згустків. В попередніх роботах [3] автори сконцентрували увагу у викладанні матеріалу на соленоїдах, що представляють собою інструменти безконтактної силової обробки електропровідних заготовок. Особливо слід відзначити попередні роботи різних авторів [4, 5], де представлено актуальні розробки і рекомендації по використанню енергозберігаючих технологій задля вирішення нагальних проблем сучасного автотранспорту.

Конструктивно обмотки біфіляра можуть бути виконані у вигляді масивних або тонкостінних багатовиткових котушок. В попередній роботі [6] автори проаналізували електромагнітні процеси в індукторних системах з масивними добре провідними біфілярами. Авторами розраховано основні характеристики дослідженої системи і чисельно проілюстровано можливість отримання досить високого рівня перетворення енергії індуктора в енергію обмоток біфіляра. У разі тонкостінних обмоток біфіляра, на відміну від масивних реалізацій, має місце інтенсивний вихід електромагнітної потужності в навколишній простір. Ці процеси вимагають аналізу і числових оцінок визначальних характеристик, що, в кінцевому підсумку, необхідно задля обґрунтування практичної дієздатності запропонованої індукторної системи.

---

© Батигін Ю.В., Шиндерук С.О., Чаплигін Є.О., Єрємін О.Ф., 2020  
ORCID ID: \*<https://orcid.org/0000-0002-1278-5621>; \*\*<https://orcid.org/0000-0002-6354-4174>;  
\*\*\*<https://orcid.org/0000-0003-1448-6091>; \*\*\*\*<https://orcid.org/0000-0002-8123-1104>

Для схем обладнання магнітно-імпульсної обробки металів, описаних в [3], практичний інтерес представляють дослідження плоских індукторних систем, де багатовитковий соленоїд-індуктор розміщується між гілками біфілярної котушки.

Так, автори [7] фундаментально досліджували процес високошвидкісного деформування листових металів магнітним полем стрижневої котушки.

У дослідженні [8] запропоновано магнітно-імпульсну установку як складову силового обладнання у технології плоского штампування. Її використання дає змогу деформувати листи з різних алюмінієвих сплавів, що досягається за допомогою різних інструментів-штампів (це питання автор розглядає як подальший предмет дослідження). Особливістю запропонованої установки є можливість її гнучкого налаштування за рахунок підбору параметрів електричної схеми.

Докладно магнітно-імпульсну обробку матеріалів було проаналізовано авторами [9] як імпульсну або високошвидкісну технологію формування за допомогою імпульсного магнітного поля для застосування сил Лоренца до заготовок, виготовлених, переважно, з високоелектропровідного матеріалу без механічного контакту та без робочого середовища.

**Метою роботи** є аналіз та оцінки характеристик електромагнітних процесів у запропонованій плоскій індукторній системі, що складається з тонкого соленоїда-індуктора, розміщеного між гілками біфіляра – тонкостінними багатовитковими котушками, які є «прозорими» для збуджених полів. Такі оцінки становлять інтерес під час вибору конструктивних рішень для нових елементів обладнання в магнітно-імпульсній обробці металів.

**Наукова новизна** полягає в проведенні аналізу електромагнітних процесів, які протікають, з числовими оцінками характеристик збуджених полів, який дає змогу дати обґрунтований науковий висновок щодо практичної дієздатності досліджуваної індукторної системи.

**Аналіз і числові оцінки.** У роботі [3] авторами отримано аналітичні залежності для полів і струмів в індукторній системі з двох ідентичних листових металів, між якими розміщений круговий індуктор. У запропонованій постановці даного завдання можна скористатися отриманими в [3] рішеннями, якщо задатися наступним:

- міжвиткові зазори обмотки збуджуючого індуктора досить малі, його поверхні можна вважати суцільними і густина струму, що протікає, розподілена рівномірно по радіусу так, що функція радіального розподілу має вигляд  $f(R) = \eta(r-R_1) - \eta(r-R_2)$ , де  $\eta(r-R_{1,2})$  – ступінчасті функції Хевісайда [12],  $R_{1,2}$  – внутрішній і зовнішній радіуси індуктора, відповідно,  $r$  – радіальна координата;
- індуктор досить тонкий і не впливає на електромагнітні процеси, що протікають в біфілярі. Витки соленоїда-індуктора виконані із металу кінцевої товщини –  $D$  є достатньо тонкими, «прозорими» для полів, що збуджуються, і не впливають на електромагнітні процеси, що протікають, а міжвиткові зазори настільки малі, що його робочі поверхні можна вважати суцільними;
- витки обмоток біфіляра щільно прилягають один до одного так, що утворюють суцільну металеву поверхню;
- електродинамічна товщина металу обмоток біфіляра досить мала, так, що  $\omega \cdot \tau < 1$ , де  $\omega$  – циклічна частота збуджуючого струму в індукторі,  $\tau = \mu_0 \cdot \gamma \cdot d^2$  – характерний час дифузії поля в немагнітний провідний шар товщиною  $d$  з питомою електропровідністю  $\gamma$  ( $\mu_0$  – магнітна проникність вакууму).

«Електродинамічну товщину» провідного шару як числову характеристику ступеня його «прозорості» для діючого поля можна визначити як величину, пропорційну відношенню характерного часу дифузії в провідний шар  $\tau$  до характерного часового параметру діючого поля, його періоду  $T$ . Згідно з

цим визначенням, електродинамічна товщина – це  $\tau/T \sim (\omega \cdot \tau)$ . У разі інтенсивних процесів проникнення  $(\omega \cdot \tau) < 1$ , що відповідає відношенню  $d/\Delta < 1$ , де  $\Delta$  – величина скін-шару [2, 3].

Задля ясності викладання на рис. 1 наведено фізико-математичну модель запропонованої кругової індукторної системи (радіальний переріз), де 1 – плоский багатовитковий соленоїд-індуктор; 2 – гілки біфіляра – плоскі багатовиткові соленоїди.

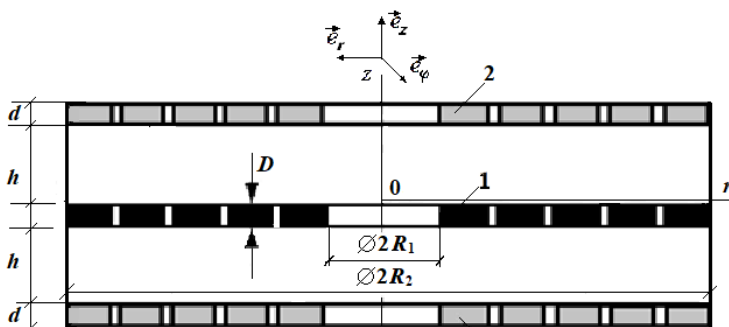


Рис. 1

З роботи авторів [3] отримаємо просторово-часову залежність для лінійної густини струму, індукованого в обмотках біфіляра. Остання в разі гармонічного процесу буде визначатися наступним виразом:

$$j_i(t, r) \approx \frac{\mu_0 \gamma}{2} \cdot (\omega \cdot \cos(\omega t)) \cdot \int_0^{\infty} f(\lambda) \cdot e^{-\lambda h} \cdot \frac{1 - e^{-\lambda d}}{\lambda} \cdot J_1(\lambda r) d\lambda, \quad (1)$$

де  $f(\lambda) = \int_{R_1}^{R_2} r \cdot J_1(\lambda r) dr$  – образ функції рівномірного радіального розподілу збуджуючого струму в індукторі,  $J_1(\lambda r)$  – функція Бесселя першого роду першого порядку,  $\lambda$  – параметр інтегрального перетворення Фур'є-Бесселя [10].

Вираз (1) перетворимо до співвідношень, що є зручними в практичних обчисленнях і встановлюють залежність відношення часових максимумів лінійної густини струму в обмотках біфіляра  $j_{im}$  і в індукторі  $j_m$  від радіусу і товщини металу обмоток.

Після необхідних тотожних перетворень отримуємо

$$\frac{j_{im}(r)}{j_m} \approx \frac{\omega \tau}{2} \cdot \int_0^{\infty} f(x) \cdot e^{-\left(x \frac{h}{d}\right)} \cdot \frac{(1 - e^{-x})}{x^3} \cdot J_1\left(x \cdot \frac{r}{d}\right) dx, \quad (2)$$

де  $f(x) = \int_{(x \cdot R_1/d)}^{(x \cdot R_2/d)} y \cdot J_1(y) dy$ ;  $x = \lambda \cdot d$  – нова змінна інтегрування.

Інтегруючи вираз (2) по радіусу  $r \in [R_1, R_2]$ , знайдемо відношення середніх радіальних величин густини індукованого і збуджуючого струму

$$\frac{\overline{j_{im}}(d)}{j_m} \approx \frac{\omega \tau}{2} \cdot \frac{d}{(R_2 - R_1)} \int_0^{\infty} f(x) e^{-\left(x \frac{h}{d}\right)} \frac{(1 - e^{-x})}{x^4} \left( J_0\left(x \frac{R_1}{d}\right) - J_0\left(x \frac{R_2}{d}\right) \right) dx, \quad (3)$$

де  $\overline{j_{im}}(d)$  – середня величина індукованого струму за фіксованої товщини  $d$ ;  $J_0\left(x \cdot \frac{R_{1,2}}{d}\right)$  – функції Бесселя першого роду нульового порядку [10].

Аналіз електромагнітних процесів проведемо на прикладі експериментальних моделей досліджуваної індукторної системи:  $R_1 = 0,015$  м,  $R_2 = 0,09$  м,  $h = 0,02$  м,  $d \in [0,0001; 0,0003]$  м, робоча частота збуджуючого струму  $f = 25000$  Гц.

Результати обчислень наведено нижче: на рис. 2, а – залежність середньої величини відносної густини індукованого струму (нормування на середню густину збуджуючого струму в індукторі) від товщини металу обмоток біфіляра, а на рис. 2, б – залежність параметра  $W(d) = \omega \tau$ , який встановлює рівень «прозорості» металу обмоток біфіляра від його товщини.

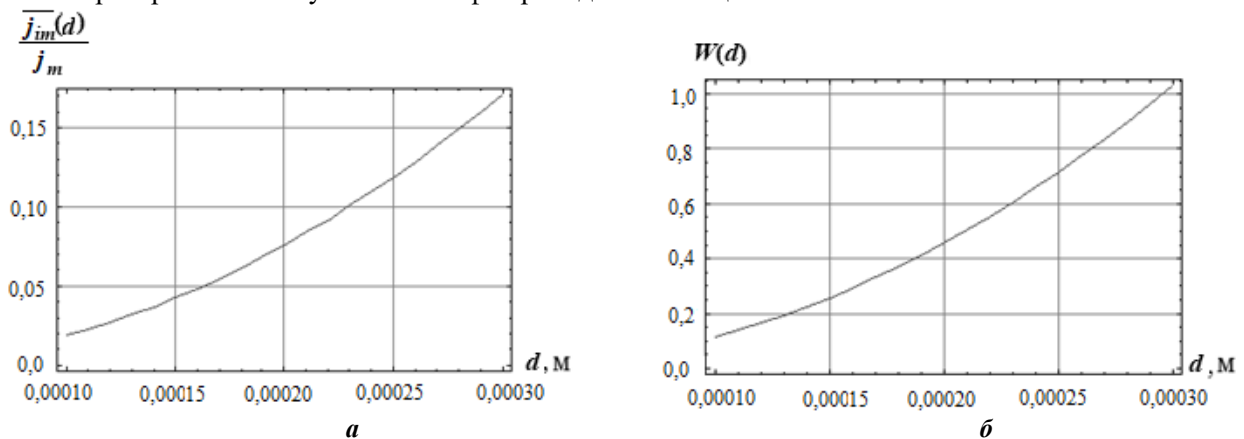


Рис. 2

Радіальний розподіл середньої величини відносної густини індукваного струму (нормування на середню густину збуджуючого струму в індукторі) показано на рис. 3.

Основні результати проведених обчислень зводяться до наступних положень.

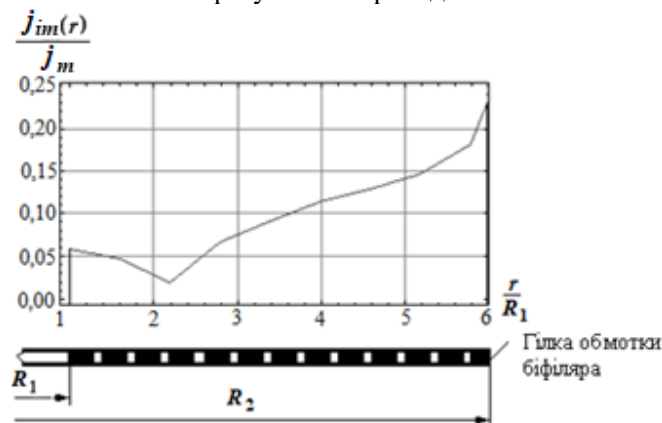


Рис. 3

3. Радіальний розподіл індукваного струму, на відміну від рівномірного розподілу струму в індукторі, має наростаючий характер від внутрішнього до зовнішнього радіусу обмотки біфіляра, що, вочевидь, вимагає посиленої ізоляції її міжвиткових зазорів.

На закінчення додамо практичне міркування, що узагальнює проведений аналіз, з якого випливає необхідність збільшення електродинамічної товщини обмоток біфіляра. Останню рекомендацію можна реалізувати або за рахунок збільшення їхньої геометричної висоти, або за рахунок застосування феромагнетиків. І перше, і друге знижують розсіювання електромагнітної енергії назовні. Відзначимо, що збільшення питомої електропровідності практично неможливо через те, що обмотка з міді має відповідний досить високий показник.

Щодо знімання індукваного сигналу по максимуму, слід враховувати і вплив паразитної міжвиткової ємності в обмотці біфіляра. Замикання частини індукваного струму по її внутрішнім паразитним контурам повинно призводити до зниження реального показника ефективності перетворення струмів від індуктора до біфіляру.

У разі збільшення геометричної висоти витків і фіксації інших розмірів пропорційно зростає паразитна ємність. Звідси випливає, що просте збільшення геометричної висоти обмотки (яке знизить розсіювання електромагнітної енергії) може супроводжуватися істотними втратами індукваного вихідного сигналу [11].

#### Висновки.

1. Проведено аналіз характеристик електромагнітних процесів у запропонованій плоскій індукторній системі, що складається з тонкого соленоїда-індуктора, який розташований між гілками біфіляра – тонкостінними багатовитковими котушками, «прозорими» для збуджених полів.

2. Обчислено основні показники електромагнітних процесів у запропонованій системі, принципове додержання яких забезпечує створення ефективних інструментів магнітно-імпульсної обробки металів.

3. Сформульовано практичні рекомендації щодо вибору ізоляції міжвиткових проміжків обмотки біфілярів, що дасть змогу уникнути електричного пробоя у режимі високих напруг.

4. Обговорюються проблеми збільшення ефективності перетворення струмів в розглянутій індукторній системі.

*Роботу виконано у Харківському національному автомобільно-дорожньому університеті за держбюджетною темою № держреєстрації 0119U001298: «Енергозберігаючі маловитратні технології створення та ремонту гібридних транспортних засобів різного призначення».*



1. Padmanabhan K., Swaminathan P. Electronic Components. New Delhi: Laxmi Publications LTD, 2006. 204 p.
2. Shneerson G.A., Dolotenko M.I., Krivosheev S.I. Strong and Superstrong Pulsed Magnetic Fields Generation. Berlin: Walter de Gruyter, 2014. 429 p.
3. Batygin Yu., Barbashova M., Sabokar O. Electromagnetic Metal Forming for Advanced Processing Technologies. Cham: Springer International Publishing AG, 2018. 94 p.
4. Батигін Ю.В., Гнатов А.В. Особливості збудження електромагнітних сил при магнітно-імпульсній обробці листових феромагнетиків. *Технічна електродинаміка*. 2012. № 1. С. 71-77.
5. Hnatov A., Arhun Shch., Ponikarovska S. Energy saving technologies for urban bus transport. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*. 2017. Vol. 14. No 4. Pp. 4649-4664.
6. Батыгин Ю.В., Гаврилова Т.В., Шиндерук С.А., Чаплыгин Е.А., Саенко В.А. Плоская индукторная система с массивными катушками бифиляра. Анализ электромагнитных процессов. *Технічна інженерія*. 2019. № 2(84). С. 115-119.
7. Shim J.-Y., Kang B.Y., Park D.-H., Kim I.S. A Fundamental Study on Magnetic Pulse Forming with Bar Forming Coil. *Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*. 2011. Vol. 20. No 3. Pp. 292-297.
8. Inanan G., Baranoglu B., Aydin E. An Application of High-Power Electromagnetic Pulse: Forming of sheet metal using electromagnetic waves. Proc. 9th International Conference on *Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*, November 2015, Bursa, Turkey. Pp. 284-288.
9. Psyk V., Rich D., Kinsley B.I., Tekkaya A.E., M. Kleiner Electromagnetic Forming – A Review. *Journal of Material Processing Technology*. 2011. No 211. Pp. 787-829.
10. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. М.: Наука, 1973. 831 с.
11. Яворский Б.М., Детлаф А.А., Лебедев А.К., Справочник по физике для инженеров и студентов ВУЗов. М.: ООО «Издательство Оникс», 2006. 1056 с.

УДК 621.318

#### **ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ПЛОСКОЙ КРУГОВОЙ СИСТЕМЕ С ИНДУКТОРОМ МЕЖДУ ТОНКИМИ КОТУШКАМИ БИФИЛЯРА**

**Ю.В. Батыгин**, докт. техн. наук, **С.А. Шиндерук**, канд. техн. наук, **Е.А. Чаплыгин**, канд. техн. наук, **Е.Ф. Еремина**, канд. техн. наук  
**Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет,**  
 ул. Ярослава Мудрого, 25, Харьков, 61002, Украина,  
 e-mail: [s.shinderuk.2016102@ukr.net](mailto:s.shinderuk.2016102@ukr.net)

*Проведен анализ электромагнитных процессов, происходящих в индукторной системе с бифилярной катушкой, а также численные оценки характеристик возбужденных токов в условиях высокой интенсивности действующих полей. Для изучения электромагнитных процессов в тонкостенных обмотках бифиляра, в отличие от их массивных реализаций, применяется строгий математический подход с применением методов теории электромагнитного поля. Численные оценки проведены с помощью полученных аналитических зависимостей. Было показано, что амплитуда тока, индуцированного в бифилярной обмотке экспериментальной модели рассматриваемой индукторной системы, в отношении к току возбуждения не превышает 10-15%, что значительно меньше возможного максимума ~ 50%. Отмечено, что радиальное распределение индуцированного тока в бифилярной обмотке, в отличие от равномерного распределения тока возбуждения в индукторе, имеет возрастающий характер от внутреннего к внешнему радиусу бифилярной обмотки. Полученные результаты позволяют оценить уровень эффективности при выборе конструктивных решений для новых элементов оборудования в магнитно-импульсной обработке металлов. Библ. 11, рис. 3.*

**Ключевые слова:** бифилярная катушка, плоская круговая индукторная система, магнитно-импульсная обработка металлов, преобразование энергии, соленоид-индуктор.

## ELECTROMAGNETIC PROCESSES IN A FLAT CIRCULAR SYSTEM WITH AN INDUCTOR BETWEEN THIN BIFILAR COILS

**Yu.V. Batygin, S.O. Shinderuk, E.O. Chaplygin, O.F. Yeryomina**  
Kharkiv National Automobile and Highway University,  
25, Yaroslava Mudruho Street, Kharkiv, 61002, Ukraine,  
e-mail: [s.shinderuk.2016102@ukr.net](mailto:s.shinderuk.2016102@ukr.net).

*The analysis of electromagnetic processes occurring in the inductor system with a bifilar coil as well the numerical estimates of the characteristics of the excited currents under conditions of high intensity of penetration of the acting fields is conducted. In order to study electromagnetic processes in thin-walled windings of a bifilar, in contrast to their massive implementations, where there is an energy intense output into the surrounding space, a strict mathematical approach with application of the theory methods of electric-magnetic field is used. The numerical estimates are conducted with help of the obtained analytical dependences. It was shown that the amplitude of the current induced in the bifilar windings of the experimental model of the considered inductor system in the ratio to the exciting current does not exceed 10-15%, which is significantly less than the possible maximum of ~ 50%. It is noted that the radial distribution of the induced current, in contrast to the uniform distribution of the exciting current in the inductor, has an increasing character from the inner to the outer radius of the bifilar winding. The obtained results allow to assess the level of efficiency when choosing design solutions for the new elements of the equipment in the magnetic-pulsed metal processing. References 11, figures 3.*

**Keywords:** bifilar coil, flat circular inductor system, magnetic-pulse treatment of metals, energy transformation, solenoid-inductor.

1. Padmanabhan K., Swaminathan P. Electronic Components. New Delhi: Laxmi Publications LTD, 2006. 204 p.
2. Shneerson G.A., Dolotenko M.I., Krivosheev S.I. Strong and Superstrong Pulsed Magnetic Fields Generation. Berlin: Walter de Gruyter, 2014. 429 p.
3. Batygin Yu., Barbashova M., Sabokar O. Electromagnetic Metal Forming for Advanced Processing Technologies. Cham: Springer International Publishing AG, 2018. 94 p.
4. Batyhin Y.V., Hnatov A.V. The features of the electrical magnetic forces excitation in the magnetic pulse sheet ferromagnetic metal working. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2012. No 1. Pp. 71-77. (Ukr)
5. Hnatov A., Arhun Shch., Ponikarovska S. Energy saving technologies for urban bus transport. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*. 2017. Vol. 14. No 4. Pp. 4649-4664.
6. Batyhin Y.V., Havrilova T.V., Shinderuk S.A., Chaplyhin Ye.A., Saenko V.A. Flat inductor system with massive bifilar coils. Analysis of electromagnetic processes. *Tekhnichna inzheneriia*. 2019. Vol. 84. No 2. Pp. 115-119. (Rus)
7. Shim J.-Y., Kang B.Y., Park D.-H., Kim I.S. A Fundamental Study on Magnetic Pulse Forming with Bar Forming Coil. *Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*. 2011. Vol. 20. No 3. Pp. 292-297.
8. Inanan G., Baranoglu B., Aydin E. An Application of High-Power Electromagnetic Pulse: Forming of sheet metal using electromagnetic waves. Proc. 9th International Conference on *Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*, November 2015, Bursa, Turkey. Pp. 284-288.
9. Psyk V., Rich D., Kinsley B.I., Tekkaya A.E., Kleiner M. Electromagnetic Forming – A Review. *Journal of Material Processing Technology*. 2011. No 211. Pp. 787-829.
10. Korn H., Korn T. Mathematical Handbook. Moskva: Nauka, 1973. 831 p. (Rus)
11. Yavorskii B.M., Detlaf A.A., Lebedev A.K. Physics handbook for engineers and students of universities. Moskva: Oniks Publishing, 2006. 1056 p. (Rus)

Надійшла 17.01.20  
Остаточний варіант 06.05.2020

## ACTIVE SHIELDING OF MAGNETIC FIELD OF OVERHEAD POWER LINE WITH PHASE CONDUCTORS OF TRIANGLE ARRANGEMENT

B.I. Kuznetsov<sup>1\*</sup>, T.B. Nikitina<sup>2\*\*</sup>, I.V. Bovdvi<sup>1\*\*\*</sup>

<sup>1</sup> Institute of Technical Problems of Magnetism National Academy of Sciences of Ukraine,  
19, Industrialna st., Kharkiv, 61106, Ukraine,  
e-mail: [kuznetsov.boris.i@gmail.com](mailto:kuznetsov.boris.i@gmail.com)

<sup>2</sup> Kharkov National Automobile and Highway University,  
25, Yaroslava Mudroho st., Kharkiv, 61002, Ukraine.

*For the first time in Ukraine the synthesis of two degree of freedom robust two-circuit system of active shielding of magnetic field, generated by overhead power lines with triangle arrangements of phase conductors is realized to reduce the magnetic flux density down to the sanitary standards level and to reduce the sensitivity of the system to plant parameters uncertainty. The synthesis is based on the multi-criteria stochastic game solution, in which the payoff vector is calculated by the solutions of the Maxwell equations as a quasi-stationary approximation. The game solution is based on the stochastic multi-swarm particle optimization algorithms. The computer simulation and field experimental results of two degree of freedom robust two-circuit system of active shielding of magnetic field, generated by overhead power lines with triangle arrangement of phase conductors are presented. References 6, figures 3.*

**Keywords:** overhead power lines, triangle arrangement of phase conductors, magnetic field, system of active shielding, computer simulation, field experimental study

**Introduction.** Many 110 kV overhead power lines (OPL) in Ukraine have a triangle arrangement of phase conductors (TTPCA) and often pass in the immediate vicinity of residential districts. Such OPL are generated magnetic field (MF), the level of which often exceeds sanitary standards of Ukraine that produces a threat to public health [1]. The methods of active contour shielding of MF generated by OPL are needed to provide the sanitary standards of Ukraine. The method of synthesis of systems of active shielding (SAS) of MF generated by OPL is developed in [2, 3]. OPL with TTPCA are generated the MF, space-time characteristics (STC) of which have the circular shape approximately. For active shielding of such a MF, at least two shielding coil (SC) are required. The open loop and closed loop control – two degree of freedom (TDOF) system is used in SAS simultaneously [4]. Such system is implemented using MF sensors installed inside and out of shielding space (SS) [2]. The SAS parameters are known indefinitely and change in time. The main uncertainty is OPL bus current, which should bring to the MF STC position change in SS. Therefore the SAS must be robust.

**The objective of the work** is to synthesize the two-degree freedom robust two-circuit systems of active shielding of magnetic field generated by overhead power lines with a triangular arrangement of wires.

**Problem statement.** We introduce the vector  $X = \{G, K_C, A_o, \varphi\}$  of the required parameters, the components of which are vector  $G$  as the spatial arrangement and geometric dimensions of the SC and the TDOF regulator parameters, including matrix  $K_C$  of the closed loop control gain and matrix  $K_o$  of open loop control gain and matrix  $\varphi$  of phase shifts. Also we introduce vector  $\Delta$  with the parameter uncertainty from their nominal values used in the system synthesis. Then the problem of TDOF SAS synthesis is associated with determination of such vector of spatial arrangement and geometric sizes of SC, as well as TDOF regulator parameters  $X$  and vector  $\Delta$  of the parameter uncertainty, at which the maximum value of the magnetic flux density at selected points  $P_j$  of the SS  $P$  assumes a minimum value for the vector  $X$ , but the maximum value for the vector  $\Delta$ . This technique corresponds to the robust systems synthesis standard worst-case approach [5], when the vector  $\Delta$  of parameter uncertainty leads to the greatest deterioration in the shielding of the initial MF generated by OPL.

**Method of synthesis.** The problem of synthesis can be formulated in the form of the following multi-criteria game [5] with vector payoff

$$B(X, \Delta) = [B(X, \Delta, P_i)]^T, \quad (1)$$

---

© Kuznetsov B.I., Nikitina T.B., Bovdvi I.V., 2020

ORCID ID: \*<https://orcid.org/0000-0002-1100-095X>; \*\*<https://orcid.org/0000-0002-9826-1123>;

\*\*\*<https://orcid.org/0000-0003-3508-9781>

the  $m$  components of which  $B(X, \Delta, P_i)$  are the magnetic flux density in  $m$  points  $P_i$  of the shielding space. The components  $B(X, \Delta, P_i)$  of the vector payoff (1) are the nonlinear functions of unknown vectors  $X$ ,  $\Delta$  and calculated by the Maxwell quasi-stationary approximation [1].

The multi-criteria game (1) is a two-player zero-sum antagonistic game [5]. The first player is the regulator parameter vector  $X$  and its strategy is the minimization of vector payoff (1). The second player is the vector  $\Delta$  of parameter uncertainty and its strategy is maximization of the same vector payoff (1). Game decision is based on multi-swarm stochastic multi-agent optimization from Pareto-optimal solutions [5, 6].

**Computer simulation.** Let us consider the result of synthesis of TDOF robust MF SAS, generated by OPL with TTPCA. Fig. 1, *a* shows the first SC (1) and the second SC (2) of two SC, 110 kV OPL with TTPCA (3) and SS (4) spatial arrangement. Both SC are square shaped and located at a height of 3.4965 m and 3.6818 m from the ground, respectively. The lower branch is located at a height of 2.4522 m and 0.6637 m from the ground. SC currents are 4.3122 A and 4.3138 A. Fig. 1, *b* shows the STC of MF, generated by OPL (1); generated by both SC (2) and the total MF with the SAS (3). As seen from this figure, STC of MF, generated by OPL (curve 1); and STC of MF, generated by SC (curve 2) are practically identical. But STC of total MF with the SAS (curve 3) is significantly less than the initial MF STC, which confirms the high SAS shielding factor [3].

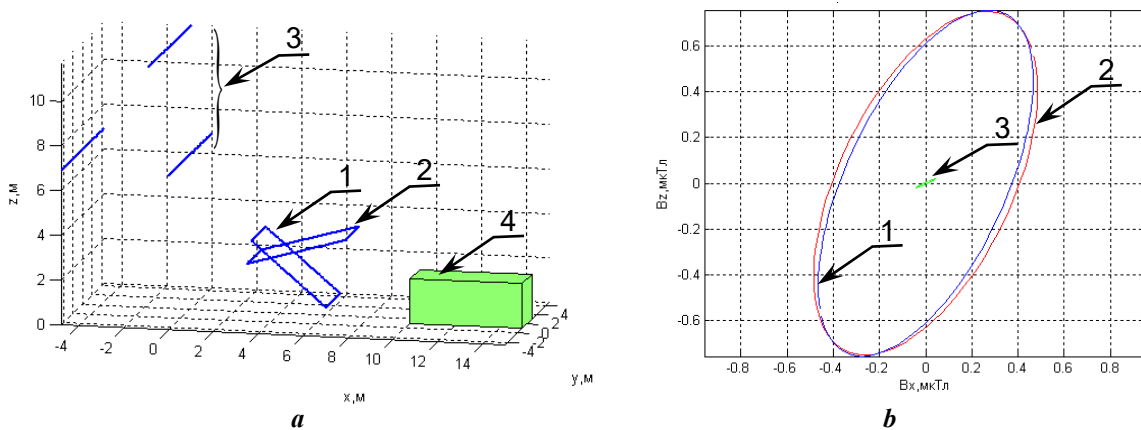


Fig. 1

Fig. 2, *a* presents the STC of MF, generated by OPL (1); generated both SC (2) and total MF with only single first SC. Fig. 2, *b* shows the same STC with single second SC. As seen, STC of only one first SC and only one second SC are straight lines. The resulting MF STC ellipse semi-major axis in the case of single SC is strictly parallel with another SC MF STC.

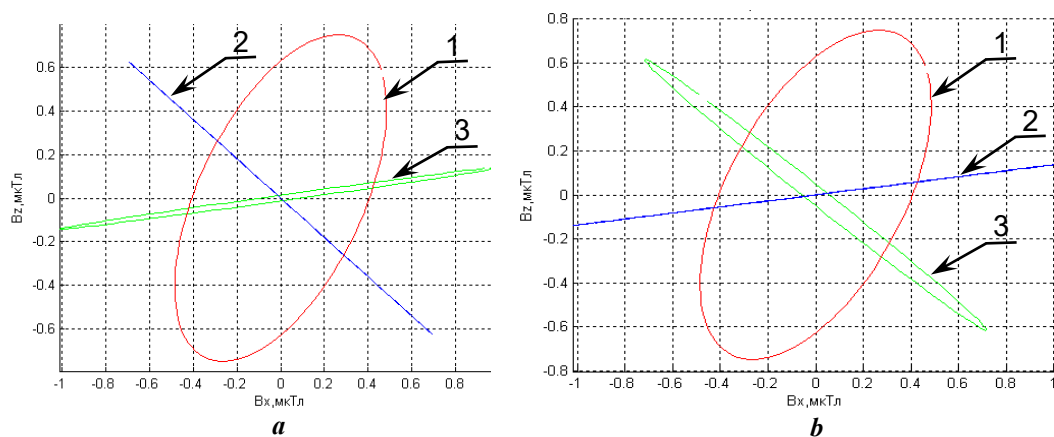
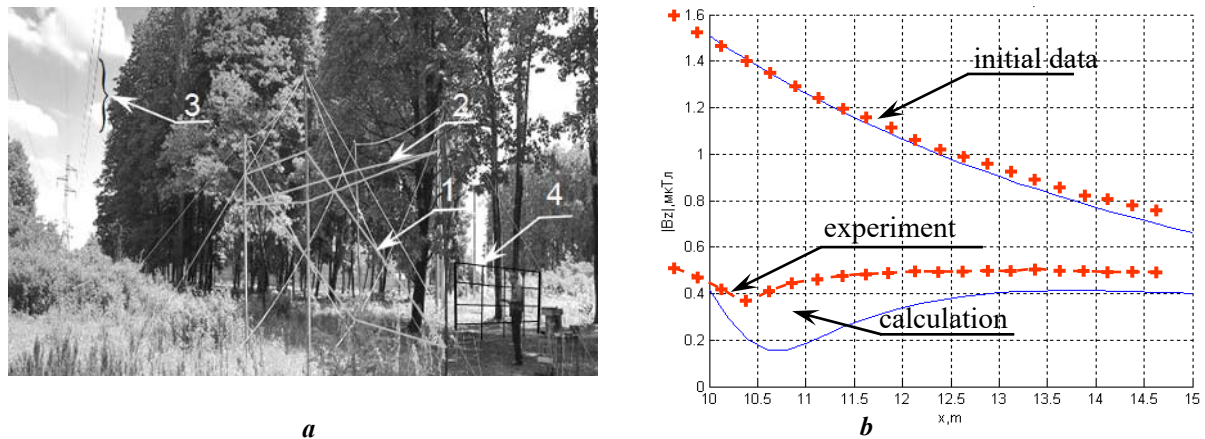


Fig. 2

**Experimental results.** Let us consider the field experimental SAS model. Fig. 3, *a* shows the first SC (1) and the second SC (2) from two SC and 110 kV OPL with TTPCA (3) spatial arrangement. Both SC contain 20 windings and are powered by TDA7294-typed amplifier. Both SC contain the external magnetic flux density controller and internal current controller. The inductive sensor is used as MF induction sensor. The measurement of MF is performed by "Lutron" magnetometer of EMF-828 type.



**Fig. 3**

Fig. 3, *b* shows the magnetic flux density obtained by measurements and simulations (solid line) with and without SAS. The experimental SAS shielding factor is more than 3. The difference of magnetic flux density found by measurements and simulations in the shielding zone does not exceed 20%.

### Conclusions

1. For the first time in Ukraine the synthesis of two-degree freedom robust two-circuit system of active shielding of magnetic field, generated by overhead power lines with triangle arrangement of phase conductors is presented to decrease the initial magnetic flux density down to the Ukrainian sanitary standards level and to reduce the sensitivity of the system to plant parameter uncertainty.

2. The synthesis of the robust system of active shielding is based on multi-criteria stochastic game decision with multi-swarm stochastic multi-agent optimization from Pareto-optimal solutions.

3. As a result of synthesis of active shielding system, the spatial position of two shielding coils as well as the parameters of regulator is determined. The system reduces the magnetic flux density in shielding space down to the Ukrainian sanitary norms and has lower sensitivity to parameter uncertainty in comparison with the known systems.

4. Field experimental study of the robust two-circuit system of active shielding of magnetic field, generated by overhead power lines with triangle arrangement of phase conductors is carried out. The comparison of experimental and calculated values of magnetic flux density within shielding space shows that their variation does not exceed 20 %.

1. Rozov V., Grinchenko V. Simulation and analysis of power frequency electromagnetic field in buildings closed to overhead lines. IEEE First Ukraine Conference on *Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*. Kyiv, Ukraine, May 29-June 2, 2017. Pp. 500-503.

2. Active Magnetic Shielding (Field Cancellation). URL: <http://emfservices.com/afcs.htm> (Accessed date: 05.11.2019).

3. Celozzi S., Garzia F. Active shielding for power-frequency magnetic field reduction using genetic algorithms optimization. *IEE Proceedings – Science, Measurement and Technology*. 2004. Vol. 151. No. 1. Pp. 2-7.

DOI: <https://doi.org/10.1049/ip-smt:20040002>.

4. Araki M., Taguchi H. Two-degree-of-freedom PID controllers. *International Journal of Control, Automation, and Systems*. 2003. Vol. 1, No. 4. Pp. 401-411.

5. Ummels M. *Stochastic Multiplayer Games Theory and Algorithms*. Amsterdam: Amsterdam University Press, 2010.

6. Kuznetsov B.I., Nikitina T.B., Kolomiets V.V., Bovdui I.V., Voloshko A.V., Vinichenko E.V. Synthesis of robust active shielding systems of magnetic field generated by group of high-voltage power lines. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2018. No 5. Pp. 34-38. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X/2018.5.06>

## АКТИВНЕ ЕКРАНУВАННЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ ІЗ РОЗТАШУВАННЯМ ФАЗНИХ ПРОВІДІВ У ВИГЛЯДІ ТРИКУТНИКА

Б.І. Кузнецов<sup>1</sup>, докт.техн.наук, Т.Б. Нікітіна<sup>2</sup>, докт.техн.наук, І.В. Бовдуй<sup>1</sup>, канд.техн.наук

<sup>1</sup> Інститут технічних проблем магнетизму НАН України,

вул. Індустріальна, 19, Харків, 61106, Україна,

e-mail: [kuznetsov.boris.i@gmail.com](mailto:kuznetsov.boris.i@gmail.com)

<sup>2</sup> Харківський національний автомобільно-дорожній університет,

вул. Ярослава Мудрого, 25, Харків, 61002, Україна.

*Вперше в Україні виконано синтез робастної двоконтурної з двома ступенями свободи системи активного екранування магнітного поля, що генерується повітряними лініями електропередачі з фазовими проводами типу «трикутник» задля зниження індукції до рівня санітарних норм та зменшення чутливості системи до незначущості параметрів об'єкту керування. Синтез ґрунтується на рішенні багатокритеріальної стохастичної гри, в якій вектор виграшу обчислюється на основі рішень рівнянь Максвелла в квазістационарному наближенні. Рішення гри ґрунтується на алгоритмах стохастичної оптимізації мультироєм частинок. Наведено результати комп'ютерного моделювання та польових експериментальних досліджень робастної двокової системи з двома ступенями свободи активного екранування магнітного поля, що генерується повітряними лініями електропередач із розташуванням фазових провідів у вигляді трикутника. Бібл. 6, рис. 3.*

**Ключові слова:** повітряні лінії електропередачі з розташуванням фазових провідів типу "трикутник", магнітне поле, система активного екранування, комп'ютерне моделювання, польові експериментальні дослідження

## АКТИВНОЕ ЭКРАНИРОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ С РАСПОЛОЖЕНИЕМ ФАЗНЫХ ПРОВОДОВ В ВИДЕ ТРЕУГОЛЬНИКА

Б.И. Кузнецов<sup>1</sup>, докт.техн.наук, Т.Б. Никитина<sup>2</sup>, докт.техн.наук, И.В. Бовдуй<sup>1</sup>, канд.техн.наук

<sup>1</sup> Институт технических проблем магнетизма НАН Украины,

ул. Индустриальная, 19, Харьков, 61106, Украина,

e-mail: [kuznetsov.boris.i@gmail.com](mailto:kuznetsov.boris.i@gmail.com)

<sup>2</sup> Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет,

ул. Ярослава Мудрого, 25, Харьков, 61002, Украина.

*Впервые в Украине выполнен синтез робастной двухконтурной с двумя степенями свободы системы активного экранирования магнитного поля, создаваемого воздушными линиями электропередачи с расположением фазных проводов типа «треугольник», для снижения индукции до уровня санитарных норм и уменьшения чувствительности системы к неопределенности параметров объекта управления. Синтез основан на решении многокритериальной стохастической игры, в которой вектор выигрыша рассчитывается на основе решений уравнений Максвелла в квазистационарном приближении. Решение игры основано на алгоритмах стохастической оптимизации мультироєм частиц. Приведены результаты компьютерного моделирования и полевых экспериментальных исследований робастной двухконтурной системы с двумя степенями свободы активного экранирования магнитного поля, создаваемого воздушными линиями электропередачи с расположением фазных проводов в виде треугольника. Библ. 6, рис. 3.*

**Ключевые слова:** воздушные линии электропередачи с расположением фазных проводов типа «треугольник», магнитное поле, система активного экранирования, компьютерное моделирование, полевые экспериментальные исследования.

Надійшла 28.02.2020  
Остаточний варіант 26.03.2020

**ФОРМУВАННЯ КОМПЕНСАЦІЙНОГО СТРУМУ ТРИФАЗНОГО ПАРАЛЕЛЬНОГО АКТИВНОГО ФІЛЬТРА ЗА ДОПОМОГОЮ РІЗНОТЕМПОВИХ КОВЗНИХ РЕЖИМІВ**

**Т.В. Мисак\***, канд.техн.наук., **В.М. Михальський\*\***, член-кор. НАН України  
 Інститут електродинаміки Національної академії наук України,  
 пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна, e-mail: [taras@igbt.com.ua](mailto:taras@igbt.com.ua)

*Досліджується керування трифазним паралельним активним фільтром, який приєднано до мережі з наявним нелінійним навантаженням. Фільтр складається з напівпровідникового інвертора напруги на повністю керованих ключах, ємнісного накопичувача та одноланкового RL-фільтра. Проведено декомпозицію об'єкта дослідження за темпами рухів динамічної системи. Двовимірна поверхня ковзання є лінійною комбінацією компонентів двовимірних векторів похибки струму RL-фільтра та двовимірної змінної, яку отримано шляхом введення в систему ковзного режиму другого порядку, у разі виникнення якого ця змінна стає еквівалентом першої похідної похибки струму. Задля стабілізації постійної напруги накопичувача використано модифікований алгоритм подвійного скручування. Побудовано імітаційну модель щодо підтвердження теоретичних припущень та проаналізовано результати цифрового моделювання. Проведено порівняння запропонованої стратегії з традиційним ПІ-регулюванням за критеріями тривалості перехідного процесу та коефіцієнтом гармонійних спотворень у струмі, який споживається з мережі. Бібл. 10, рис. 4.*

**Ключові слова:** паралельний активний фільтр, ковзний режим, поверхня ковзання, компенсаційний струм, декомпозиція рухів.

**Вступ.** Паралельні активні фільтри (ПАФ) залишаються найбільш ефективним та дієвим технічним рішенням, спрямованим на нівелювання негативного впливу нелінійних навантажень, наявних в мережі споживача, на показники якості електроенергії в цій мережі. Задачам побудови керування ПАФ та їхнім окремим аспектам продовжує присвячуватись достатньо велика кількість публікацій. Для керування силовими перетворювачами ПАФ в багатьох конфігураціях широко застосовуються різні методи, починаючи з новітніх альтернативних таких, як fuzzy-logic, wavelet або нейронно-мережеві, до майже класичних, як то просторово-векторна широтно-імпульсна модуляція (ШІМ), одно- та двотактне керування, ковзні режими [1-3].

**Постановка задачі.** Силу схему електричної системи, яка складається з IGBT-інвертора з RL-елементами на виході та накопичувальним конденсатором, неідеальної мережі живлення і нелінійного навантаження, показано на рис. 1, де прийняті такі позначення:  $L_g, L_L, L_f, R_g, R_L, R_f$  – індуктивності та активні опори трифазної мережі живлення, нелінійного навантаження та фільтра відповідно;  $E_g, U_g$  – миттєві значення ЕРС та напруг мережі;  $I_g, I_L, I_f$  – струми мережі, нелінійного навантаження та вихідний струм ПАФ;  $I_m, I_d$  – струми в ланках постійного струму нелінійного навантаження та ПАФ;  $C_m, C_{fc}$  – ємності в ланках постійного струму нелінійного навантаження та ПАФ;  $U_{dc}$  – постійна напруга на фільтровому конденсаторі ПАФ.

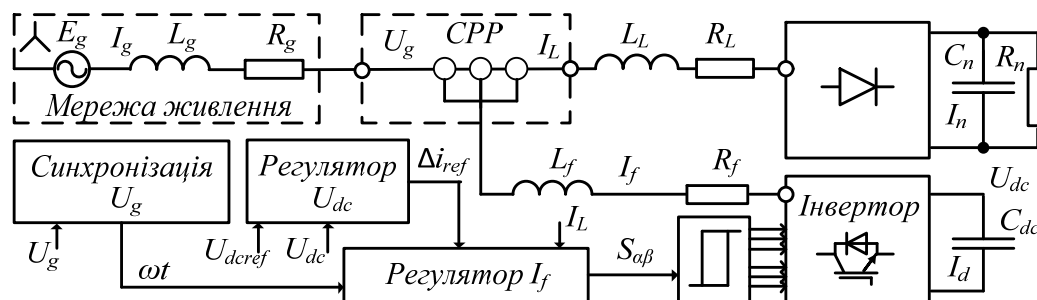


Рис. 1

© Мисак Т.В., Михальський В.М., 2020  
 ORCID ID: \*<https://orcid.org/0000-0002-3140-971X>; \*\*<https://orcid.org/0000-0002-8251-3111>

У процесі розробці системи керування (СК) необхідно враховувати, що контур керування постійною напругою ланки має бути відділений від формування струму компенсації, а до сигналу завдання струму не мають домішуватись ані компоненти перехідних процесів, ані гармоніки фундаментальної частоти (частоти мережі). Частково такі вимоги щодо підтримання  $U_{dc}$  можна задовольнити, вибираючи конденсатор  $C_{fc}$  відповідної ємності. Проте значне збільшення ємності  $C_{fc}$  не є прийнятним шляхом, оскільки при цьому значно зростають масо-габаритні показники ПАФ. Другим ключовим параметром, за допомогою якого можна вплинути на розмах пульсації модуляційної складової напруги в точках приєднання ПАФ до мережі (СРР), може виступати індуктивність  $L_f$ . Збільшення  $L_f$  дає змогу знизити величину пульсації, проте при цьому відповідно знижується номер найвищої гармоніки струмів нелінійного навантаження, які ПАФ здатен компенсувати. Окрім цього погіршується динаміка ПАФ, а досягнення компромісу не завжди є можливим або прийнятним з точки зору збільшення масо-габаритних показників ПАФ [4].

**Мета** роботи полягає в побудові стратегії керування ПАФ, яка забезпечує підтримання коефіцієнта потужності, що дорівнює одиниці, та мінімізує вплив нелінійного навантаження на гармонічний склад струму, споживаємого з мережі живлення, зберігаючи при цьому високу швидкість та точність, які притаманні системам керування, розробленим з використанням методів теорії систем із змінною структурою (ковзних режимів).

**Розв'язок.** Компенсуючі струми, які інжектуються ПАФ, описуються за допомогою системи диференціальних рівнянь (СДР) в системі координат  $\alpha$ - $\beta$

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} I_{f\alpha} \\ I_{f\beta} \end{pmatrix} = -\frac{R_f}{L_f} \begin{pmatrix} I_{f\alpha} \\ I_{f\beta} \end{pmatrix} - \frac{1}{L_f} \begin{pmatrix} U_{g\alpha} \\ U_{g\beta} \end{pmatrix} + \frac{U_{dc}}{L_f} \begin{pmatrix} u_{f\alpha} \\ u_{f\beta} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

де  $I_{f\alpha,\beta}$  – компоненти двовимірного вектора компенсаційного струму;  $U_{g\alpha,\beta}$  – компоненти двовимірного вектора напруги мережі живлення;  $R_f=R_\alpha=R_\beta$ ,  $L_f=L_\alpha=L_\beta$  – активний опір та індуктивність фільтра на виході інвертора ПАФ;  $u_{f\alpha,\beta}$  – компоненти двовимірного вектора керування.

З іншого боку, струми, які протікають в індуктивностях фільтра, використовуються для утримання такого рівня постійної напруги  $U_{dc}$ , який дає змогу генерувати компенсаційні струми необхідної амплітуди. Тому для ланки постійного струму ПАФ є справедливим рівняння

$$\frac{dU_{dc}}{dt} = \frac{1}{C_{dc}} I_d = \frac{1}{C_{dc}} \begin{pmatrix} I_{f\alpha} \\ I_{f\beta} \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} u_{c\alpha} \\ u_{c\beta} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

де  $u_{c\alpha,\beta}$  – компоненти двовимірного вектора керування, нетотожні  $u_{f\alpha,\beta}$  з (1).

Оскільки фазові швидкості в СДР (1) та (2) істотно відрізняються, то у разі синтезу керування можна вдатись до принципу декомпозиції рухів, в т.ч. за допомогою розривного керування [5].

**Синтез регулятора напруги.** Зарадити проблемі, що виникає внаслідок суперпозиції в змінній  $I_d$  компенсуючого струму та струму заряду накопичувального конденсатора, може бути застосований підхід, який полягає в ініціюванні ковзного режиму другого порядку для стабілізації  $U_{dc}$  шляхом введення алгоритмів «скручування» або «подвійного скручування» (в англійській літературі вони отримали назви Twisted та Super Twisted Algorithms, скорочено STA [6, 7] або STW).

Задля збільшення швидкості базового варіанта регулятора з алгоритмом подвійного скручування [6, 8], доповнимо його доданком  $-\eta \cdot \delta_U$ . Модифікований таким чином алгоритм матиме вигляд [9]

$$\begin{aligned} \Delta i_{ref} &= -\lambda |\delta_U|^{1/2} \text{sign}(\delta_U) + v - \eta \delta_U; \\ \frac{dv}{dt} &= -\alpha \text{sign}(\delta_U) \end{aligned}, \quad (3)$$

і за виконання умов  $|\Delta i_{ref}| \leq \gamma$ ,  $1 + \gamma_1 < \gamma$ ,  $\eta \cdot |\delta_U| \leq \gamma_1$  та  $\eta$ ,  $\gamma$ ,  $\gamma_1 > 0$  ( $\eta$ ,  $\gamma$ ,  $\gamma_1$  – константи), забезпечує асимптотичну стійкість в метриці похибки  $|\delta_U| + |d\delta_U/dt|$  ковзного режиму другого порядку [8].

**Синтез регулятора струму.** Примусове введення ковзного режиму здатне забезпечити високу швидкість [5] при слідуванні за компенсаційним струмом, тому перейдемо до похибки керування ним, ввівши двовимірний вектор похибки звичним чином –  $\delta_{\alpha,\beta} = I_{fref\ \alpha,\beta} - I_{f\alpha,\beta}$ ,  $I_{fref\ \alpha,\beta}$  – завдання двохкоординатного вектора компенсаційного струму ПАФ. Хоча в системі з одноланковим  $RL$ -фільтром можна забезпечити бажаний характер руху зображуючої точки за рахунок ковзних режимів першого порядку, використовуючи тільки відхилення вихідної координати, вважається, що більш складна поверхня ковзання здатна поліпшити характеристики відпрацювання струму. Тому



двовимірну поверхню ковзання в підпросторі похибок можна записати в системі координат  $\alpha$ - $\beta$  у вигляді [10]

$$S_{\alpha,\beta} = \delta_{\alpha,\beta} + \tau_1 \dot{\delta}_{\alpha,\beta}, \quad (4)$$

де  $\tau_1$  – стала, яка визначає бажану швидкодію реакції на збурення та точність відпрацювання.

Оскільки бажаний вектор компенсаційного струму можна визначити як

$$\begin{pmatrix} I_{fref\alpha} \\ I_{fref\beta} \end{pmatrix}^T = \begin{pmatrix} \Delta i_{ref} \cos \omega t - I_{L\alpha} \Delta i_{ref} \sin \omega t - I_{L\beta} \end{pmatrix}^T,$$

де  $\Delta i_{ref}$  – амплітуда струму, за рахунок якої формується  $U_{dc}$  таке, що  $|U_{dc}| > 3/2 \cdot \sup |U_g|$ ;  $\omega$  – кругова частота мережі. Вважаючи, що  $U_{dc}$  змінюється набагато повільніше, ніж  $I_f$ , можна виключити похідні компонент завдання з формули (4), тоді

$$\begin{aligned} S_\alpha &= \delta_\alpha - \tau_1 (\omega \Delta i_\beta - \dot{I}_{g\alpha}) \\ S_\beta &= \delta_\beta + \tau_1 (\omega \Delta i_\alpha + \dot{I}_{g\beta}) \end{aligned} \quad (5)$$

де  $\Delta i_\alpha = \Delta i_{ref} \cos \omega t$ ,  $\Delta i_\beta = \Delta i_{ref} \sin \omega t$ .

В електричній схемі (рис. 1) немає можливості безпосереднього вимірювання компонент  $\dot{I}_{g\alpha,\beta}$ , тому введемо ще один двовимірний вектор похибки для струму мережі живлення в системі координат  $\alpha$ - $\beta$   $\sigma_{\alpha,\beta} = x_{\alpha,\beta} - I_{g\alpha,\beta}$ , після чого доповнимо СДР (1) рівняннями

$$\frac{d}{dt} x_{\alpha,\beta} = u_{2\alpha,\beta}, \quad \frac{d}{dt} z_{1\alpha,\beta} = f(u_{2\alpha,\beta}, \sigma_{\alpha,\beta}), \quad (6)$$

де  $f(u_2, \sigma)$  – двовимірний кусочно-неперервна вектор-функція виду

$$f(u_{2\alpha,\beta}, \sigma_{\alpha,\beta}) = \begin{cases} -u_{2\alpha,\beta} \text{ if } |u_{2\alpha,\beta}| > K_2 \\ -\alpha \text{sign}(\sigma_{\alpha,\beta}) \text{ if } |u_{2\alpha,\beta}| \leq K_2 \end{cases},$$

де  $\alpha, K_2 > 0$  – деякі константи, а вигляд невідомої двовимірної змінної  $u_2$  буде визначено нижче.

Після чого застосуємо стратегію непрямого керування і перепишемо (1) з урахуванням переходу до струму мережі  $I_{g\alpha,\beta} = I_{L\alpha,\beta} - I_{f\alpha,\beta}$  та доповнення (6) у векторно-матричному вигляді

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} x_{\alpha\beta} \\ z_{1\alpha\beta} \\ I_{g\alpha\beta} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} a_{ij} \\ z_1 \\ I_g \end{bmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ F_{\alpha\beta}(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} u_2 \\ f(u_2, \sigma) \\ u_f \end{pmatrix}, \quad (7)$$

де  $a_{31} = -(R_f + R_g)/(L_f + L_g)$ ,  $a_{32} = 1/(L_f + L_g)$ ,  $a_{ij} = \{a_{31} \mid_{i,j=3}; 0 \mid_{i,j \neq 3}\}$ ,  $F_{\alpha\beta}(t) = a_{32}(E_{g\alpha,\beta} + R_f I_{L\alpha,\beta} + L_f \dot{I}_{L\alpha,\beta})$  – збурення, яке є обмеженим,  $u_f = -a_{32} U_{dc} [\text{sign}(S_\alpha), \text{sign}(S_\beta)]^T$ .

Одночасне використання ковзних режимів, які відповідають поверхням ковзання, залежним від похибок  $\sigma$  та  $\delta$ , дає змогу ввести ієрархію ковзних режимів [5]. Перший ковзний режим реального часу за компонентою  $u_f$  вектора керування з (7), швидкість якого обмежена неідеальністю ключів інвертора, матиме меншу частоту перемикачів ключового елемента, ніж другий. Другий ковзний режим, який примусово вводиться для додаткової змінної  $x$  за допомогою компоненти  $u_2$  вектора керування з (7), виконується лише програмно, тому його швидкість обумовлена тільки швидкодією системи керування та програмно заданими константами.

Виходячи з наведеного вище, керування  $u_2$  можна конструювати двокомпонентним і представити у вигляді [8]

$$u_2 = z_{1\alpha\beta} + \begin{cases} -\lambda |\sigma_0|^\rho \text{sign}(\sigma_{\alpha\beta}) \text{ if } |\sigma_{\alpha\beta}| > \sigma_0 \\ -\lambda |\sigma_{\alpha\beta}|^\rho \text{sign}(\sigma_{\alpha\beta}) \text{ if } |\sigma_{\alpha\beta}| \leq \sigma_0 \end{cases}, \quad (8)$$

де  $\lambda > 0$ ,  $\rho = [0 \dots 1]$ ,  $\sigma_0 > 0$  – константи, а  $z_{1\alpha\beta}$  відіграє роль саме “операторної змінної” [8].

Обмеженість  $I_g$  та  $U_{dc}$  дозволяє стверджувати, що завжди можна вибрати величину  $I_m$  так, щоб виконувалась нерівність  $\sup |I_g(t)| < I_m$ . Поклавши  $\rho = 1$ ,  $K_2 > I_m$  (або вибравши  $K_2 = 1$ , та  $u_2 = I_m (z_1 + z_2)$ ) та підбравши достатньо великі  $\alpha$  та  $\lambda/\alpha$ , можна стверджувати, що спершу в системі (7) з керуванням (8) виникне стійкий ковзний режим другого порядку. В цьому режимі похибка  $\sigma$  та її похідна  $d\sigma/dt$  прямують до нуля для будь-якої фазової траєкторії системи з експоненційною оцінкою згори і не швидше, ніж експоненційно. Оскільки після виникнення цього режиму  $d\sigma/dt = dx/dt - dI_g/dt = 0$ , то є справедливою рівність  $dI_g/dt = dx/dt$ . Ввівши позначення  $z = dI_g/dt = u_2$ , вираз для поверхні ковзання (5) можна переписати таким чином

$$\begin{aligned} S_\alpha &= \delta_\alpha - \tau_1 (\omega \Delta i_\beta - z_\alpha) \\ S_\beta &= \delta_\beta + \tau_1 (\omega \Delta i_\alpha + z_\beta) \end{aligned} \quad (9)$$

що дає можливість використання нової поверхні ковзання заміною (5) на (9) та дає змогу уникнути наближених спрощених формул [9] або застосування операції прямого обчислення похідної.

**Результати моделювання.** Оскільки синтез регуляторів проводиться за припущень ідеальності СК та силової схеми, необхідна перевірка належного функціонування системи за умов, які враховують динамічні неідеальності. Для цього розроблено імітаційну модель системи з ПАФ, на якій проведено цифрове імітаційне моделювання. На рис. 2 – 4 наведено приклади результатів цифрового моделювання для таких параметрів силової частини системи:

- трифазна мережа живлення напругою  $U_\phi = 230\text{В}$  та частотою 50 Гц, індуктивність та активний опір якої обчислюються, виходячи зі стумів КЗ  $I_{к.з.} = 2\text{ кА}$  та  $\cos\varphi_{к.з.} = 0.1$ ;
- завдання напруги  $U_{dref} = 690\text{В}$  з допустимою похибкою  $|\delta_U| \leq \gamma_1 = 0.1$ ;
- ємність конденсатора  $C_{dc} = 3300\text{ мкФ}$ ;
- вихідний фільтр з індуктивністю  $L_f = 1.8\text{ мГн}$  та опором  $R_f = 0.06\text{ Ом}$ ;
- параметри додаткового лінійного  $RL$ -навантаження:  $R = 7.05\text{ Ом}$ ,  $L = 13.0\text{ мГн}$ ;
- опір активного навантаження  $R_n = 42.32\text{ Ом}$ ;
- параметри  $L_L, R_L, C_n$  нелінійного навантаження відповідають ПЧ DANFOSS з  $P_{nom} = 7.5\text{ кВт}$ .

Параметри СК та налаштування коефіцієнтів регуляторів контуру напруги:  $\lambda = \sqrt{2}$ ,  $\alpha = \sqrt{2}/C_{dc}$ ,  $\eta = 1/\sqrt{2}$ .

Параметри СК та налаштування коефіцієнтів регуляторів контуру струму  $\lambda = 16.0e+05$ ,  $\alpha = 2.0e+04$ , гістерезис  $\Delta = 3.2\text{ А}$ ,  $\sigma_0 = 0.1$ ,  $\rho = 1/2$ ,  $\tau_I = U_{dref} * L_f / R_f / 380 / \sqrt{2} / \Delta / \omega$ , які дозволили отримати середню частоту комутації ключів інвертора приблизно 19.5 кГц.

На рис. 2 показано спектральний склад струму мережі після завершення перехідного процесу за підтриманням коефіцієнту потужності рівного одиниці (рис. 2, а) та на рис. 2, б – у випадку комбінованого навантаження (нелінійне та додаткове лінійне  $RL$ -навантаження).

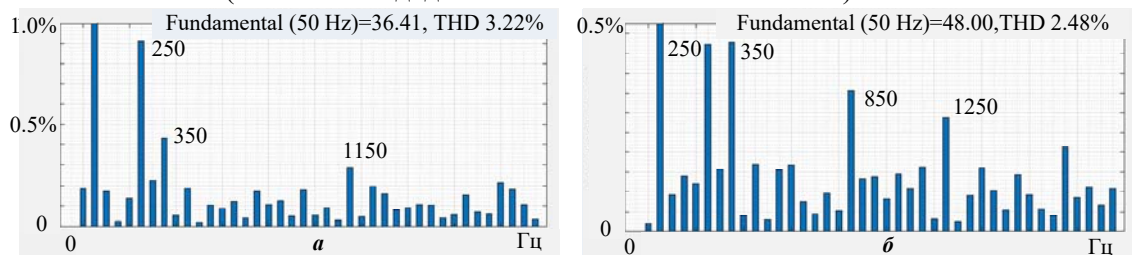


Рис. 2

Використання поверхні ковзання (9) знизило амплітуди 5-ї та 7-ї гармонік у порівнянні із СК з традиційним ПІ-регулятором та слідкуванням лише за похибкою, змістивши максимуми гармонічних складових в бік вищих частот в район 17-ої та 25-ої гармонік.

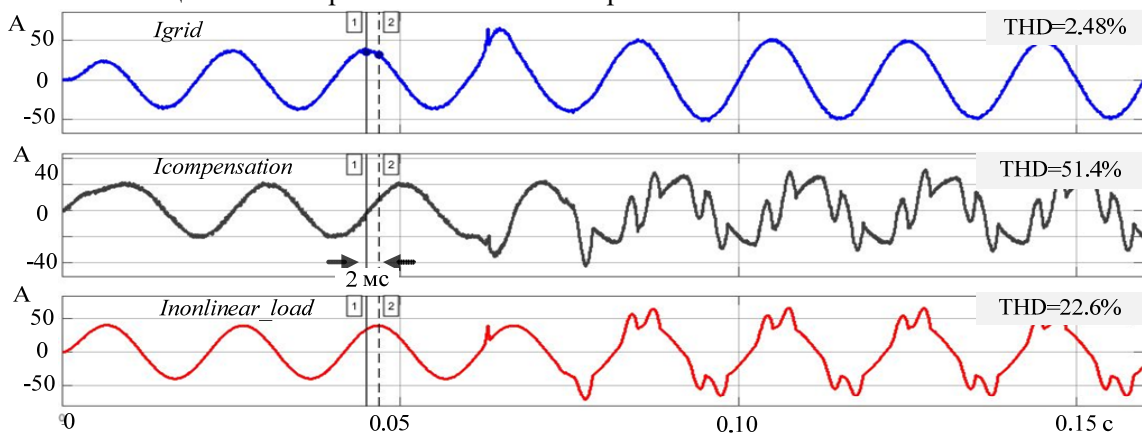


Рис. 3

На рис. 3 наведено отримані графіки струму мережі, компенсаційного струму та струму нелінійного навантаження для запропонованого керування (3) та ковзного режиму в контурі струму з поверхнями ковзання (9) на: інтервалі  $[0, 0.06]$  сек – лінійне  $RL$ -навантаження та на інтервалі  $[0.06,$

0.16] сек – додатково вмикається нелінійне навантаження. THD струму нелінійного навантаження на відрізьку [0.06, 0.16] сек становить 22.6%, після компенсації -2.48% (THD компенсаційного струму там же -51.4%).

На рис. 4 наведено графіки напруги  $U_{dc}$ , похибки напруги  $\delta U$ , сигнал виходу регулятора  $\Delta i_{ref}$  з керуванням (3) з використанням поверхонь ковзання (9) на: інтервалі [0, 0.06] сек – лінійне  $RL$ -навантаження та на інтервалі [0.06, 0.16] сек – додатково вмикається нелінійне навантаження. Дослідження за допомогою імітаційної моделі підтвердили, що СК з асимптотичним алгоритмом скручування показує більшу швидкість, ніж традиційний ПІ-регулятор.

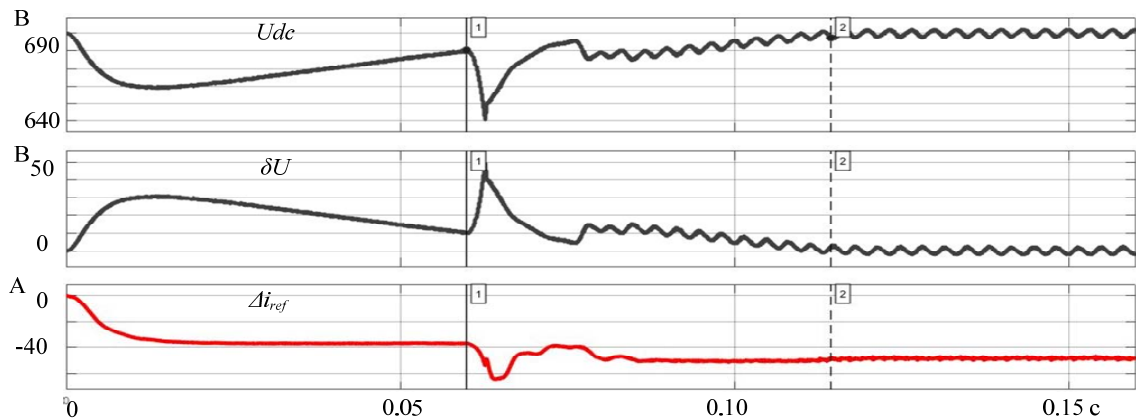


Рис. 4

Збільшення загальної швидкості ПАФ на майже 30% призвело до збільшення THD на незначну величину (0.07%), проте відповідно знизило амплітуди 5-ї та 7-ї гармонік у порівнянні з ПІ-регулятором, змістивши максимуми з 5-ї та 7-ї гармонік в бік 11-ої та 17-ої.

**Висновки.** Показано можливість реалізації стратегії слідкування за компенсаційним струмом, в якій для обчислення поверхні ковзання використовується похибка струму та наближене значення похідної, яке визначається за допомогою введення в систему ще одного контуру керування з ковзним режимом другого порядку. Підтверджено, що застосування алгоритму асимптотичного скручування на базі ковзного режиму другого порядку в контурі слідкування за напругою не генерує неочікуваних коливальних процесів, властивих регуляторам з ковзними режимами першого порядку.

Роботу виконано за бюджетною темою «Розробка та дослідження ефективних засобів і методів керування напівпровідниковими перетворювачами та електромеханічними системами для забезпечення електромагнітної сумісності джерел електроенергії та споживачів» № 0115U002581 (КПКВ – 6541030).

1. Singh B., Chandra A., Al-Haddad K. Power Quality Problems and Mitigation Techniques. John Wiley, 2015. 582 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118922064>.
2. Михальський В.М. Засоби підвищення якості електроенергії на вході та виході перетворювачів частоти та напруги з широтно-імпульсною модуляцією. К.: Інститут електродинаміки НАН України, 2013. 340 с.
3. Luis Morán, Juan Dixon, Miguel Torres. Active Power Filters. Butterworth-Heinemann, 2018. Pp. 1341-1379. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811407-0.00046-5>.
4. Akagi H. Modern active filters and traditional passive filters. *Bulletin of the polish academy of sciences technical sciences*. 2006. Vol. 54. No 3. Pp. 255-269. URL: [http://bluebox.ippt.pan.pl/~bulletin/\(54-3\)255.pdf](http://bluebox.ippt.pan.pl/~bulletin/(54-3)255.pdf).
5. Дракунов С.В., Изосимов Д.Б., Лукьянов А.Г., Уткин В.А., Уткин В.И. Принцип блочного управления. *Автоматика и телемеханика*. 1990. № 5. С. 38-47.
6. Shtessel Y., Taleb M., Plestan F. A novel adaptive-gain supertwisting sliding mode controller: Methodology and application. *Automatica*, 2012. Vol.48. Pp.759-769. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2012.02.024>.
7. Kamal S., Chalanga A., Moreno J., Fridman L., Bandyopadhyay B. Higher Order Super-Twisting Algorithm. Proc. 13th International Workshop on *Variable Structure Systems (VSS)*, Nantes, 2014. Pp. 1-5. DOI: <https://doi.org/10.1109/VSS.2014.6881129>.
8. Емельянов С.В., Коровин С.К., Левантовский Л.В. Новый класс алгоритмов скольжения второго порядка. *Математическое моделирование*. 1990. Т. 2. № 3. С. 89-100.
9. Денисенко К.І., Кутрань І.С., Лесик В.О., Мисак Т.В. Збільшення швидкості контуру слідкування за напругою накопичувального конденсатора трифазного паралельного активного фільтра. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2020. №55. С. 22-30. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2020.55.022>.
10. Bandyopadhyay B., Sivaramkrishnan Janardhanan, Spurgeon S.K. Advances in sliding mode control: concept, theory and implementation, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-36986-5>.

## ФОРМИРОВАНИЕ КОМПЕНСАЦИОННОГО ТОКА ТРЕХФАЗНОГО ПАРАЛЛЕЛЬНОГО АКТИВНОГО ФИЛЬТРА С ПОМОЩЬЮ РАЗНОТЕМПОВЫХ СКОЛЬЗЯЩИХ РЕЖИМОВ

Т.В. Мысак, канд.техн.наук, В.М. Михальський, докт.техн.наук

Институт электродинамики Национальной академии наук Украины,

пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина,

e-mail: [taras@igbt.com.ua](mailto:taras@igbt.com.ua)

*Исследуется управление трехфазным параллельным активным фильтром, присоединенным к сети, в которой имеется нелинейная нагрузка. Фильтр состоит из полупроводникового инвертора напряжения, емкостного накопителя и однозвенного RL-фильтра. Проведена декомпозиция объекта исследования по темпам движений динамической системы. Двумерная поверхность скольжения является линейной комбинацией компонентов двумерных векторов погрешности тока RL-фильтра и двумерной переменной, полученной путем введения в систему скользящего режима второго порядка, при возникновении которого эта переменная становится эквивалентом первой производной погрешности тока. Для стабилизации постоянного напряжения накопителя использован модифицированный алгоритм двойного скручивания. Для подтверждения теоретических предположений построена имитационная модель и проанализированы результаты цифрового моделирования. Проведено сравнение предложенной стратегии с традиционным ПИ-регулированием по критериям продолжительности переходного процесса и коэффициента гармонических искажений в токе, который потребляется из сети. Библ. 10, рис. 4.*

**Ключевые слова:** параллельный активный фильтр, скользящий режим, поверхность скольжения, компенсационный ток, декомпозиция движений.

## FORMATION OF THE COMPENSATING CURRENT OF A THREE-PHASE SHUNT ACTIVE POWER FILTER USING MULTIPLE-RATE SLIDING MODES

T.V. Mysak, V.M. Mikhalskyi

Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,

Peremohy ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine,

e-mail: [taras@igbt.com.ua](mailto:taras@igbt.com.ua)

*It's studied the control of a three-phase parallel active filter, which is connected to a network in which there is a nonlinear load. This filter consists of a semiconductor voltage inverter, capacitive storage and a single-order RL filter. The object of research was decomposed according to the rate of movement of the dynamic system. The two-dimensional sliding surface is a linear combination of the components of the two-dimensional current error vectors of the RL filter and the two-dimensional variable obtained by introducing the second-order sliding mode into the system, at the occurrence of which this variable becomes equivalent to the first derivative of the current error. This avoided the use of a separate filter for high-frequency modulation components in the measured current. To stabilize the value of DC voltage, a modified double twisting algorithm is used. To confirm the theoretical assumptions, a simulation model is built and the results of digital experiments are analyzed. A comparison of the proposed strategy with traditional PI control according to the criteria of the duration of the transient process and the harmonic distortion coefficient in the current that is consumed from the network is made. References 10, figures 4.*

**Keywords:** shunt active power filter, sliding mode, compensating current, sliding manifold, movies decomposition.

1. Singh B., Chandra A., Al-Haddad K. Power Quality Problems and Mitigation Techniques. John Wiley, 2015. 582 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118922064>.
2. Mykhalskiy V.M. Means for improving the quality of electricity at inputs and outputs of frequency and voltage transformers with Pulse-With-Modulation. Kyiv: Institute of electrodynamics of NAS of Ukraine, 2013. 340 p. (Ukr)
3. Luis Morán, Juan Dixon, Miguel Torres. Active Power Filters. Butterworth-Heinemann, 2018. Pp. 1341-1379. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811407-0.00046-5>.
4. Akagi H. Modern active filters and traditional passive filters. *Bulletin of the polish academy of sciences technical sciences*. 2006. Vol. 54. No 3. Pp. 255-269. URL: [http://bluebox.ippt.pan.pl/~bulletin/\(54-3\)255.pdf](http://bluebox.ippt.pan.pl/~bulletin/(54-3)255.pdf)
5. Drakunov S.V., Izosimov D.B., Luk'yanov A.G., Utkin V.A., Utkin V.I. The block control principle. *Avtomatika i Telemekhanika*, 1990. No 5. Pp. 38-47. (Rus).
6. Shtessel Y., Taleb M., Plestan F. A novel adaptive-gain supertwisting sliding mode controller: Methodology and application. *Automatica*. 2012. Vol. 48. Pp. 759-769. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2012.02.024>.
7. Kamal S., Chalanga A., Moreno J., Fridman L., Bandyopadhyay B. Higher Order Super-Twisting Algorithm. Proc. 13th International Workshop on *Variable Structure Systems (VSS)*, Nantes, 2014. Pp. 1-5. DOI: <https://doi.org/10.1109/VSS.2014.6881129>.
8. Emelyanov S.V., Korovin S.K., Levantovskii L.V. A family of new regulators based on second order sliding mode. *Matematicheskoje Modelirovanije*. 1990. Vol.2. No 3. Pp.89-100.
9. Denysenko K.I., Kutran I.S., Lesyk V.A., Mysak T.V. Increasing the performance of the voltage control subsystem of the storage capacitor of a three-phase parallel active filter. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky NAN Ukrainy*. 2020. № 55. Pp. 22-30. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2020.55.022>.
10. Bandyopadhyay B., Sivaramakrishnan Janardhanan, Spurgeon S.K. Advances in sliding mode control: concept, theory and implementation, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-36986-5>.

Надійшла 28.02.2020  
Остаточний варіант 17.04.2020

**ФОРМУВАННЯ ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ ПОВНІСТЮ КЕРОВАНОГО ГІБРИДНОГО ДЖЕРЕЛА ЖИВЛЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ**

**С.М. Пересада\***, докт. техн. наук, **Є.О. Ніконенко\*\***, **М.М. Желінський\*\*\***, **В.С. Решетник\*\*\*\***  
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського»,  
пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна, e-mail: [sergei.peresada@gmail.com](mailto:sergei.peresada@gmail.com)

*В роботі представлено результати експериментальних досліджень та рекомендації щодо формування динамічних режимів гібридного джерела живлення для електричних транспортних засобів, що містить акумуляторні батареї та блок суперконденсаторів. Відповідно до розробленої методики тестування струм навантаження сформовано на основі заданих діаграм моменту та швидкості, які відповідають руху типового електричного транспортного засобу. Показано, що системи гібридних джерел живлення з фіксованим налаштуванням фільтра розподілу частот забезпечують кращі умови роботи акумуляторних батарей порівняно з акумуляторним живленням, проте не гарантують ефективний розподіл струмів для всіх динамічних режимів руху транспортного засобу. Бібл. 10, рис. 4.*

**Ключові слова:** гібридне джерело живлення, електричний транспортний засіб, фільтр розподілу частот, формування динамічних режимів

**Вступ.** Перехід від транспортних засобів з двигунами внутрішнього згоряння до повністю електричних транспортних засобів (ЕТЗ) стримується недовговічністю акумуляторних батарей (АКБ), а також зниженням корисної ємності та терміну їхньої служби внаслідок дії швидкозмінного та пікового навантаження, яке є типовим для ЕТЗ [1, 2]. Повністю керовані гібридні джерела живлення (ГДЖ) на основі АКБ та блоку суперконденсаторів (СК) дають змогу покращити умови роботи АКБ. В таких системах АКБ постачають повільно змінну потужність, тоді як СК працюють в перехідних режимах як буферні накопичувачі [1-3]. Блок СК прибирає з АКБ пікове швидкозмінне навантаження та навантаження вище номінального, що подовжує термін дії АКБ [3, 4]. Незважаючи на інтенсивні дослідження ГДЖ для автономних ЕТЗ, теорія керування процесами енергообміну між АКБ, блоком СК та тяговим двигуном перебуває на початковій стадії розвитку, що обумовлюється як складністю задач керування, так і обмеженими можливостями використання аналітичних методів синтезу алгоритмів керування та їхнього дослідження [1, 3-5]. В той же час верифікація теоретичних результатів в умовах реального ЕТЗ потребує значних капіталовкладень і не є раціональною на початкових стадіях розробки, тому їх зазвичай виконують на модельних прикладах шляхом експериментальних імітаційних досліджень [2, 6].

Одним з найбільш важливих питань керування ГДЖ електромеханічних систем ЕТЗ є розподіл струмів між АКБ та СК в перехідних режимах, який здійснюється шляхом розділення струму джерела живлення на повільну та швидко складові за допомогою, наприклад, спеціальної конфігурації фільтра розподілу частот (ФРЧ) [1, 2, 4]. Рішення [4] є ефективним для накопичувачів енергії мереж живлення зі ступінчатою зміною навантаження. Для розділення струмів у [7] використовується алгоритм, що мінімізує зміну стану заряду АКБ. У [8] застосовано обмежувач похідної струму АКБ, який концептуально є аналогом ФРЧ. Результати досліджень [1, 4, 7, 8] свідчать, що загально визнаного рішення задач формування динамічних режимів ГДЖ для ЕТЗ до теперішнього часу не знайдено. Більшість досліджень базується на результатах математичного моделювання без експериментального підтвердження і верифікації математичних моделей АКБ і СК, параметри і структура яких залежать не тільки від їхнього типу, але й режимів навантаження у складі електромеханічної тягової системи. У [2, 6] представлено результати розробки станції швидкого прототипного тестування, верифікації математичних моделей АКБ і СК, а також розробки алгоритмів і дослідження динамічних властивостей векторно-керованих електроприводів, які підтвердили, що апаратна частина і програмне забезпечення дають змо-

© Пересада С.М., Ніконенко Є.О., Желінський М.М., Решетник В.С., 2020  
ORCID ID: \* <https://orcid.org/0000-0001-8948-722X>; \*\* <https://orcid.org/0000-0003-2379-5566>;  
\*\*\* <https://orcid.org/0000-0003-4862-1802>; \*\*\*\* <https://orcid.org/0000-0002-8428-0446>

гу проводити повномасштабні експериментальні дослідження алгоритмів керування тяговими електро-механічними системами ЕТЗ з гібридними джерелами живлення.

Дослідження динаміки ГДЖ, результати яких підтверджено експериментально, отримано в умовах ступінчатого навантаження [2, 4] або навантаження, що відповідає графіку руху ЕТЗ за так званним циклом “driving cycle” [8]. Перші дозволяють оцінити динамічні властивості в умовах стандартних для систем керування впливів, але не відповідають умовам навантаження у складі тягового електроприводу, в той час як другі можуть надати лише інтегровану оцінку без визначення впливу окремих ділянок руху на ефективність розподілу струмів.

Метою роботи є: а) розробка методики дослідження динамічних режимів ГДЖ шляхом експериментального тестування та математичного моделювання, яка забезпечує формування навантажень у відповідності до типових складових діаграм руху ЕТЗ з векторно-керованими асинхронними і синхронними електроприводами; б) аналіз ефективності розподілу струмів ГДЖ у порівнянні з тільки акумуляторним живленням, розробка рекомендацій щодо налаштувань ФРЧ; в) оцінка точності стандартних моделей АКБ та СК в умовах струмового керування, яке реалізується повністю керованими ГДЖ. Дослідження виконано на платформі швидкого прототипного тестування ГДЖ, в якій на відміну від [2], застосовано літій-іонні АКБ. За технологію розподілу струмів обрано таку, що розроблено у [4] на основі ФРЧ з фіксованим налаштуванням, яка на сьогодні вважається найбільш прогресивною.

**1. Математична модель гібридного джерела живлення, блоку суперконденсаторів та акумуляторних батарей і критерії порівняння.** Для дослідження енергорозподілу в ГДЖ використано математичну модель повністю керованого ГДЖ на базі двох підвищувальних DC-DC перетворювачів [2]

$$\dot{V}_{dc} = (p_{bt}i_{bt}/2 + p_{sc}i_{sc}/2 - i_L)/C, \quad \dot{i}_{bt} = (-Ri_{bt} + V_{bt} - V_{dc}p_{bt}/2)/L, \quad \dot{i}_{sc} = (-Ri_{sc} + V_{sc} - V_{dc}p_{sc}/2)/L, \quad (1)$$

де  $dx/dt = \dot{x}$ ,  $p_{bt}, p_{sc} \in [0;2]$  – сигнали керування ключами;  $V_{dc}$  – напруга ланки постійного струму;  $V_{bt}, i_{bt}, V_{sc}, i_{sc}$  – напруги та струми АКБ та СК відповідно;  $i_L$  – струм навантаження;  $C$  – вихідна ємність;  $L, R$  – індуктивність та опір дроселів.

Модель Теневіна з модифікаціями Трембле для літій-іонних АКБ має вигляд [9]

$$E_{bt} = N_s E_0 - K_1 Q \left( \frac{1-u}{Q-i_t} + \frac{u}{i_t + k_c Q} \right) i_f - \frac{K_2 Q}{Q-i_t} N_p i_t + N_s A e^{-N_p B i_t}, \quad \dot{i}_t = \frac{i_{bt}}{3600}, \quad u = \begin{cases} 0, & i_f \geq 0, \\ 1, & i_f < 0, \end{cases} \quad (2)$$

$$V_{bt} = E_{bt} - i_{bt} R_i N_s / N_p, \quad \dot{i}_f = (-i_f + i_{bt}) / T_p,$$

де ідентифіковані експериментально параметри моделі АКБ типу Swing 5300:  $E_0=3.65$  В – ідеальна ЕРС;  $E_{bt}$  – реальна ЕРС;  $K_1=8$  В/(А·год) – поляризаційна константа;  $K_2=8$  мОм – поляризаційний опір;  $Q=5.3$  А·год – максимальна ємність;  $i_t$  – витрачений заряд;  $k_c=0.01$  – коефіцієнт споживаного струму при заряді;  $T_p=30$  с – поляризаційна постійна часу;  $i_f$  – фіктивний струм, що визначає вплив поляризації;  $A=0.56$  В – амплітуда експоненційної зони;  $B=0.2$  (А·год)<sup>-1</sup> – зворотна стала часу експоненційної зони;  $R_i=30$  мОм – внутрішній активний опір;  $N_s$  – кількість послідовних елементів;  $N_p$  – кількість паралельних віток.

Модель використаного блоку СК з 40 послідовних елементів типу ESHSR-0005C0-002R7 [2]

$$\dot{V}_C = (-V_C + V_{sc}) / C_{sc} R_s, \quad \dot{V}_{sc} = (V_C - R_s i_{sc}) / (1 - R_s / R_p), \quad (3)$$

де  $V_{sc}$  – вихідна напруга блоку СК;  $V_C$  – напруга на еквівалентній ємності  $C_{sc}=1.2$  Ф; послідовний опір  $R_s=0.64$  Ом, який характеризує активні втрати; паралельний опір  $R_p=11$  кОм, що описує саморозряд.

Для порівняння умов роботи АКБ в системах живлення застосовано загально прийняті критерії, які найбільше впливають на деградацію АКБ [3, 10]: а) максимальне значення струму в одному елементі АКБ  $i_{1c}=i_{bt}/N_p$ ; б) швидкість зміни струму АКБ. Відмітимо, що визначення допустимої швидкості зміни струму АКБ та її вплив на ресурсні показники до цього часу не отримало кількісних оцінок.

**2. Алгоритм керування гібридним джерелом живлення, розроблений авторами у [2], включає:**

– регулятори струму АКБ та СК

$$p_{bt} = 2 \left( V_{bt} - Ri_{bt}^* + Lk_{i1} \tilde{i}_{bt} + Lk_{i2} x_{bt} \right) / V_{dc}, \quad \dot{x}_{bt} = \tilde{i}_{bt}, \quad p_{sc} = 2 \left( V_{sc} - Ri_{sc}^* + Lk_{i1} \tilde{i}_{sc} + Lk_{i2} x_{sc} \right) / V_{dc}, \quad \dot{x}_{sc} = \tilde{i}_{sc}, \quad (4)$$

де  $\tilde{i}_{bt} = i_{bt} - i_{bt}^*$ ,  $\tilde{i}_{sc} = i_{sc} - i_{sc}^*$  – похибки відпрацювання струмів;  $i_{bt}^*$ ,  $i_{sc}^*$  – задані струми АКБ і СК відповідно;  $k_{i1}>0$ ,  $k_{i2}>0$  – коефіцієнти пропорційної та інтегральної складових регуляторів струму;

– нелінійний ПІ-регулятор напруги ланки постійного струму

$$i_{\Sigma}^* = C(-k_v \tilde{z} - k_{vi} x_v) / (2V_{bt}), \quad \dot{x}_v = \tilde{z}, \quad (5)$$

де  $i_{\Sigma}^*$  – сумарний заданий струм, необхідний для інвертора;  $k_v > 0$ ,  $k_{vi} > 0$  – коефіцієнти пропорційної та інтегральної складових регулятора напруги;  $\tilde{z} = z - V_{dc}^{*2}$  – похибка регулювання напруги,  $z = V_{dc}^2$ ;

– нелінійний ФРЧ, який складається з фільтра низьких частот (ФНЧ) та алгоритму формування заданого струму СК [4]

$$i_{bt}^* = (-i_{bt}^* + i_{\Sigma}^*)/T_f, \quad i_{sc}^* = V_{bt} (i_{\Sigma}^* - i_{bt}^*)/V_{sc}. \quad (6)$$

Алгоритм (4) – (6) потребує вимірювання напруг АКБ та СК та забезпечує: а) асимптотичне регулювання напруги ланки постійного струму; б) асимптотичне відпрацювання заданих струмів АКБ та СК; в) обмеження максимального значення струму АКБ; г) обмеження швидкості зміни струму АКБ.

**3. Методика тестування, результати експерименту і моделювання.** Дослідження процесів енергообміну між АКБ та СК виконано на станції швидкого прототипного тестування, схему якої наведено на рис. 1. Станція складається з АКБ, блоку СК, двох DC-DC перетворювачів та емулятора

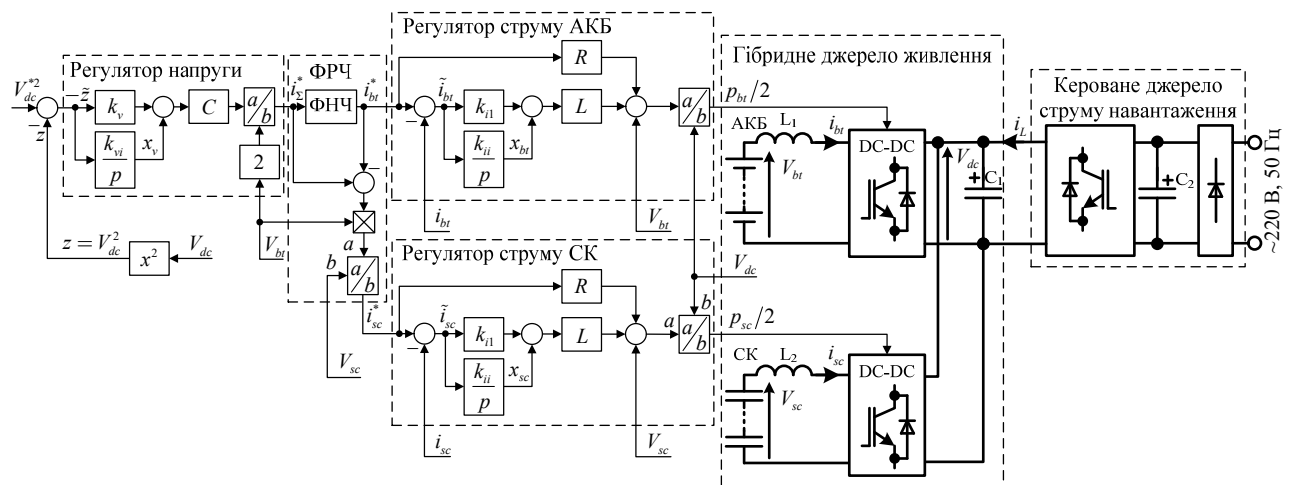


Рис. 1

руху ЕТЗ на основі керованого джерела струму, яке емулює струм навантаження для ГДЖ (струм тягового електропривода). Для порівняння двох блоків АКБ (одного – у складі ГДЖ, а другого – у складі акумуляторного живлення) необхідно, щоб їхні потужності були однакові. Для ГДЖ використано  $N_s=13$  послідовних елементів та  $N_p=2$  паралельних віток. Для випадку акумуляторного живлення використано  $N_s=26$  послідовних елементів та  $N_p=1$  паралельна вітка. Алгоритм керування DC-DC перетворювачами, а також джерелом струму навантаження, реалізовано на розробленому контролері на основі цифрового сигнального процесору TMS320F28335.

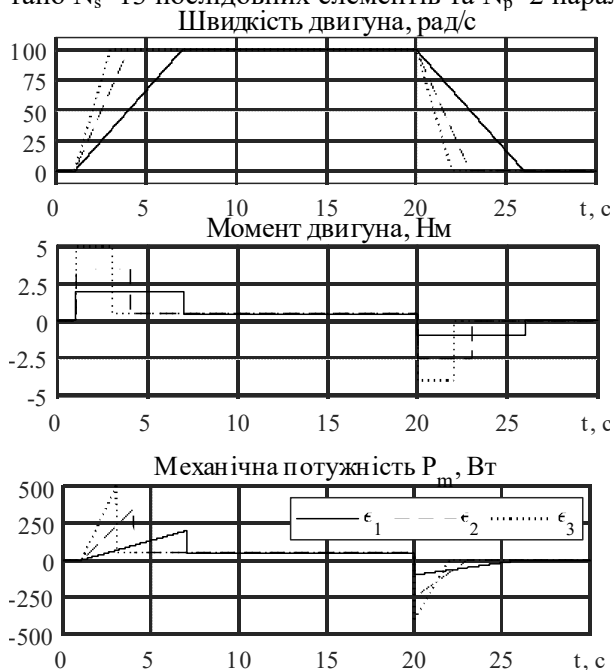


Рис. 2

На відміну від дослідження [4], де використовується постійне резистивне навантаження, та дослідження [2], в якому навантаження здійснюється стрибкоподібним накиданням-скиданням струму, методика, що пропонується, передбачає формування струму навантаження на основі розрахунку, виходячи з типових діаграм руху ЕТЗ. В процесі дослідження розподілу струмів у системах живлення використано послідовність керування для блоку навантаження, яку наведено на рис. 2: 1) емулюється розгін ЕТЗ в умовах різних заданих прискорень  $\epsilon$ ; 2) двигун працює з постійною швидкістю, покриваючи постійні втрати; 3) двигун гальмується. Вихідна механічна потужність  $P_m$  перераховується до електричної потужності  $P_a$  з урахуванням втрат, які

присутні в двигуні. Струм навантаження дорівнює  $i_L = P_a / V_{dc}$ . Така методика розрахунку струму навантаження може застосовуватись для всіх типів тягових електроприводів з векторно-керованими двигунами змінного струму.

Для дослідження визначено три значення прискорення:  $\varepsilon_1=16.7 \text{ рад/с}^2$ ,  $\varepsilon_2=33.3 \text{ рад/с}^2$  та  $\varepsilon_3=50 \text{ рад/с}^2$ , які відповідають мінімальному, середньому та максимальному прискоренню емульованого ЕТЗ. Коефіцієнти регуляторів у всіх тестах прийнято наступними: для регуляторів струму (4)  $k_{i1} = 600$ ,  $k_{i2} > k_{i1}^2/4$ ; для регулятора напруги (5)  $k_v = 100$ ,  $k_{vi} > k_v^2/4$ . Початкова напруга блоку СК дорівнює 90 В, задана вихідна напруга  $V_{dc}^* = 100 \text{ В}$ . Метою експериментальних досліджень є встановлення впливу налаштувань ФРЧ на розподіл струмів в ГДЖ при різних значеннях прискорення ЕТЗ, а також покращення умов роботи АКБ у складі ГДЖ порівняно з чисто акумуляторним живленням.

*Дослідження налаштування ФРЧ.* Графіки перехідних процесів за умови розгону ЕТЗ з прискореннями  $\varepsilon_1 - \varepsilon_3$  наведено на рис. 3. Суцільні лінії відповідають сумарному заданому струму  $i_\Sigma^*$ , який необхідний для тягового двигуна ЕТЗ, штриховими та пунктирними лініями – струм АКБ  $i_{bt}$  за умови різного налаштування ФРЧ. Додатній напрямок струму відповідає розряду ГДЖ. Початкове налаштування ФРЧ відповідає  $T_f = 1.0 \text{ с}$  для всіх випадків прискорення. Струм СК розраховується відповідно до (6).

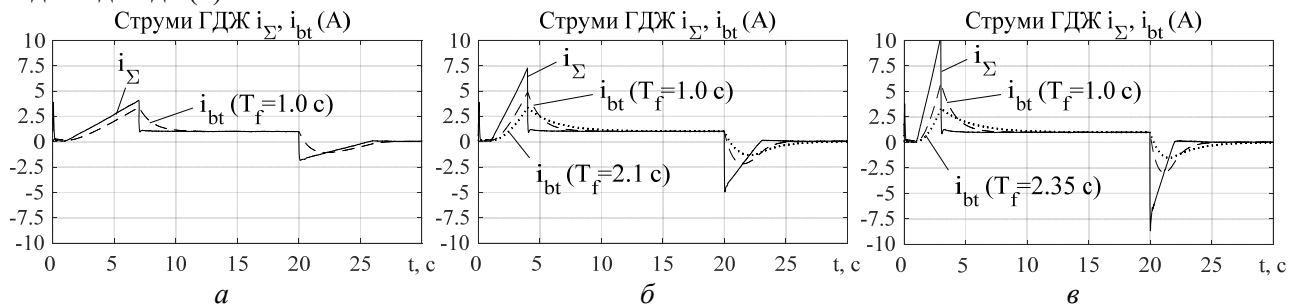


Рис. 3

З графіків видно, що фіксоване налаштування не забезпечує обмеження струму АКБ на певному рівні для кожного режиму роботи ЕТЗ. З метою обмеження максимального струму АКБ на однаковому рівні ( $i_{bt} = 3.3 \text{ А}$ ) ФРЧ було переналаштовано для випадків прискорень  $\varepsilon_2$  та  $\varepsilon_3$  до рівня  $T_f = 2.1 \text{ с}$  та  $T_f = 2.35 \text{ с}$  відповідно. Необхідно відмітити, що інтегральне значення  $i_{bt}$  залишається постійним при розгоні та гальмуванні, тобто АКБ зберігає/витрачає однакову кількість енергії незалежно від налаштування ФРЧ. З аналізу рис. 3 випливає, що різні прискорення  $\varepsilon_1 - \varepsilon_3$  потребують відповідного налаштування ФРЧ; процеси розгону, виходу на постійну швидкість та сповільнення ЕТЗ потребують різного налаштування навіть в умовах однієї діаграми швидкості.

З результатів тестування для різних значень початкової напруги СК встановлено важливу особливість роботи ГДЖ. Формування заданого струму СК відповідно до (6) забезпечує такий розподіл струмів, що блок СК постачає саме те значення миттєвої потужності, яке відповідає поточному рівню його напруги. Для систем ГДЖ з фіксованим налаштуванням ФРЧ, а саме для блоку СК, немає можливості отримати більше енергії від ЕТЗ, ніж було віддано. Потенційно адаптація ФРЧ дасть змогу перевести всю енергію рекуперації до блоку СК, а потім розряджати його на АКБ з лімітованим значенням струму та швидкістю заряду, або використати накопичену енергію для інтенсивного розгону без залучення АКБ.

*Дослідження розподілу струмів для ГДЖ та акумуляторного живлення.* Порівняння умов роботи АКБ у разі живлення ЕТЗ від ГДЖ та тільки від АКБ виконано для максимального прискорення  $\varepsilon_3$  зі сталою часу  $T_f = 2.35 \text{ с}$ . Результати моделювання цього режиму зображено на рис. 4, а, де суцільні лінії показують сумарний заданий струм, штрихові лінії – струм АКБ, а пунктирні лінії – струм СК. На рис. 4, б суцільні лінії показують струм в одному елементі АКБ для випадку живлення від ГДЖ, а штрихові лінії відповідають струму в елементі АКБ за умови акумуляторного живлення.

Відмітимо, що струм навантаження  $i_L$  для живлення тільки від АКБ дорівнює струму АКБ, проте він у два рази менший за  $i_\Sigma^*$  для ГДЖ, адже напруга елементів АКБ дорівнює напрузі ланки постійного струму, а для випадку ГДЖ – напруга елементів АКБ у два рази менша. Для акумуляторного живлення використано одну паралельну вітку елементів, тому в усіх елементах струм дорівнює  $i_{1c} = i_{bt}$ . Для ГДЖ застосовано 2 вітки, тому струм в елементі АКБ  $i_{1c} = i_{bt}/2$ .



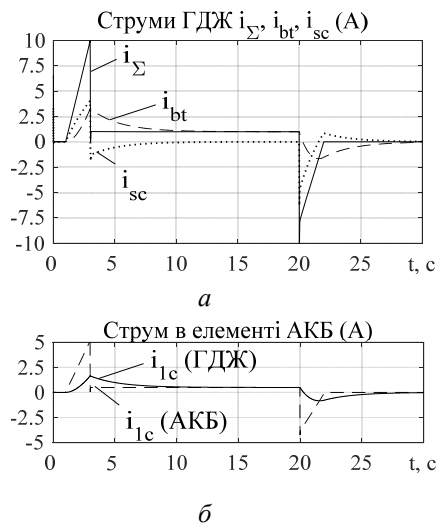


Рис. 4

на кожній із ділянок руху. Підтверджено, що системи ГДЖ на основі ФРЧ з фіксованим налаштуванням забезпечують кращі умови роботи АКБ в перехідних процесах, ніж для випадку акумуляторного живлення ЕТЗ. Водночас, загальноприйняте фіксоване налаштування не гарантує ефективного розподілу струмів між АКБ та СК для всіх динамічних режимів руху ЕТЗ, що потребує адаптації параметрів ФРЧ відповідно до динамічних режимів тягового електропривода, а саме розгону, виходу на постійну швидкість та сповільнення ЕТЗ. За результатами досліджень динамічних режимів ГДЖ встановлено, що стандартні моделі ГДЖ, АКБ та СК на основі обґрунтованих припущень поєднують простоту та достатню точність для дослідження процесів енергообміну в керованих ГДЖ.

Відзначимо поведінку ГДЖ при гальмуванні, що починається у момент часу  $t = 20$  с. Спочатку перехідний струм заряджає блок СК. Після того, як сумарний струм  $i_{\Sigma}^*$  та  $i_{bt}$  стають рівними ( $t \approx 22$  с), навантаження спадає швидше, ніж може змінитися струм АКБ. Тому СК постачають зарядний струм до АКБ для підтримки гладкої форми  $i_{bt}$ . З порівняння рис. 4 та рис. 3, в впливає, що використані моделі ГДЖ та джерел живлення забезпечують достатню точність моделювання. З аналізу рис. 4 випливає, що адаптивне налаштування ФРЧ може потенційно зменшити струм в елементах АКБ: для показаного випадку струм  $i_{1c}$  зменшено більше, ніж втричі до 1.5 А для живлення від ГДЖ у порівнянні з 5 А – для живлення від АКБ.

**Висновки.** Розроблена методика дослідження динамічних процесів енергообміну між джерелами живлення і тяговим електроприводом дає змогу формувати струми навантаження, які відповідають типовим діаграмам руху ЕТЗ і дають можливість оцінювати ефективність розподілу струмів між АКБ та СК

1. Hemmati R., Saboori, H. Emergence of hybrid energy storage systems in renewable energy and transport applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. Vol. 65. Pp. 11-23. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.06.029>
2. Peresada S., Nikonenko Y., Kovbasa S., Kuznietsov A., Pushnitsyn D. Rapid prototyping station for batteries-supercapacitors hybrid energy storage systems. *IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO-2019)*. Ukraine. Kyiv. April, 16-18. 2019. Pp. 826-831. DOI: <https://doi.org/10.1109/ELNANO.2019.8783731>
3. Zhang C., Min H., Yu Y., Wang D., Luke J., Opila D., Saxena S. Using CPE function to size capacitor storage for electric vehicles and quantifying battery degradation during different driving cycles. *Energies*. 2016. Vol. 9. Pp. 1-23.
4. Kollimalla S. K., Mishra M. K., Ukil A., Gooi H. B. DC grid voltage regulation using new HESS control strategy. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. April, 2017. Vol. 8. No 2. Pp. 772-781.
5. Peresada S., Kovbasa S., Pristupa D., Pushnitsyn D., Nikonenko Y. Nonlinear control of voltage source AC-DC and DC-DC boost converters. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universiteta Kharkivskii politekhnichnyi instytut. Problemy avtomatyzovanoho elektropryvodu. Teoriia ta praktyka. Sylova elektronika ta energoefektyvnist*. Kharkiv. 2017. No 27. Pp. 84-88. (Rus)
6. Peresada S., Kovbasa S., Nikonenko Y., Bozhko S. Concept of experimental research for electrical vehicle electromechanical systems with hybrid energy storages. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2018. No 5. Pp. 57-60. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.15407/technd2018.05.057>
7. Zhang S., Xiong R., Zhou X. Comparison of the topologies for a hybrid energy-storage system of electric vehicles via a novel optimization method. *Sci. China Technological Sci*. 2015. Vol. 58. No 7. Pp. 1173-1185.
8. Akar F., Tavlasoglu Y., Vural B. An energy management strategy for a concept battery/ultracapacitor electric vehicle with improved battery life. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. 2017. Vol. 3. No 1. Pp. 191-200.
9. Tremblay O. Experimental validation of a battery dynamic model for EV applications. *World Electric Vehicle Journal*. May, 2009. Vol. 3. Pp. 289-298.
10. Keil P., Jossen A. Impact of dynamic driving loads and regenerative braking on the aging of lithium-ion batteries in electric vehicles. *Journal of the electrochemical society*. 2017. Vol. 164. No 13. Pp. A3081-A3092.

## ФОРМИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ПОЛНОСТЬЮ УПРАВЛЯЕМОГО ГИБРИДНОГО ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

С.М. Пересада, докт. техн. наук, Е.А. Никоненко, Н.Н. Желинский, В.С. Решетник  
НТУ Украины «Киевский политехнический институт им. И. Сикорского»,  
пр. Победы, 37, Киев, 03056, Украина,  
e-mail: [sergei.peresada@gmail.com](mailto:sergei.peresada@gmail.com)

*В работе представлены результаты экспериментальных исследований и рекомендации по формированию динамических режимов гибридного источника питания для электрических транспортных средств, содержащего аккумуляторные батареи и блок суперконденсаторов. Ток нагрузки сформирован на основе заданных диаграмм момента и скорости, которые соответствуют движению электрического транспортного средства. Показано, что системы гибридных источников питания с фиксированной настройкой фильтра распределения частот обеспечивают лучшие условия работы аккумуляторных батарей в сравнении с аккумуляторным питанием транспортного средства. Библ. 10, рис. 4.*

**Ключевые слова:** гибридный источник питания, электрическое транспортное средство, фильтр распределения частот, формирование динамических режимов

## FORMATION OF DYNAMIC MODES OF FULL-CONTROLLED HYBRID ENERGY STORAGE SYSTEM FOR ELECTRIC VEHICLES

S. Peresada, Ye. Nikonenko, M. Zhelinskyi, V. Reshetnyk  
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”,  
Peremohy ave., 37, 03056, Kyiv, Ukraine,  
e-mail: [sergei.peresada@gmail.com](mailto:sergei.peresada@gmail.com)

*In this paper, the results of the experimental investigations of the dynamic modes of the hybrid energy storage system for electric vehicles are shown which is based on the batteries and supercapacitors. The recommendations on the formation of dynamical modes are presented. The load current is formed based on diagrams of the motor torque and speed which correspond to the movement of a typical electric vehicle. It is experimentally shown that hybrid energy storage systems with a fixed configuration of the decoupling filter improve the batteries operation conditions, comparing with the battery-only source, but cannot guarantee effective currents distribution for all dynamic modes of an electric vehicle. References 10, figures 4.*

**Keywords:** hybrid energy storage system, electric vehicle, distribution filter, dynamic modes forming

Надійшла 28.02.2020  
Остаточний варіант 14.04.2020

## ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ НАМАГНІЧУВАННЯ ТА РОЗМАГНІЧУВАННЯ ВЕКТОРНО-КЕРОВАНОВОГО АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

О.І. Толочко\*, докт. техн. наук; Д.В. Калугін\*\*

НТУ України «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського»,  
пр. Перемоги 37, м. Київ, 03056, Україна,  
e-mail: [tolochko.ola@gmail.com](mailto:tolochko.ola@gmail.com)

*Знайдено оптимальні сталі часу експоненціальних законів намагнічування та розмагнічування векторно-керованого асинхронного двигуна, що забезпечують мінімізацію теплових втрат від потокоутворюючих складових струмів статора і ротора, та наведено формули для розрахунку цих втрат. Виконано порівняння досліджу-ваних процесів за загально прийнятим та оптимальним керуванням за експоненціальним та лінійним законами методом математичного моделювання. Бібл. 9, рис. 2, табл. 1.*

**Ключові слова:** асинхронний двигун, намагнічування, розмагнічування, оптимізація

**Постановка проблеми.** Відомо, що на теперешній час більш ніж 50% виробленої електроенергії споживається електроприводами. Тому зниження втрат потужності в електроприводах за рахунок оптимізації їхніх систем керування є актуальною проблемою, обговоренню якої присвячена багато джерел. Для прикладу можна ознайомитися з аналітичним оглядом [1], який стосується керування асинхронними двигунами (АД), та наведеними в ньому посиланнями.

Серед електричних приводів з високими вимогами до динаміки електроприводи постійного струму та системи векторного керування асинхронними двигунами виділяються загальною особливістю – наявністю двох каналів керування. Спочатку ці двигуни намагнічують у нерухомому стані (перший канал керування), а потім приводять їх до руху через канал управління електромагнітним моментом, швидкістю або кутовим положенням двигуна. Під час пауз повторно-короткочасного режиму двигуни, як правило, не розмагнічують, що призводить до додаткових втрат у міді. Тому проблема мінімізації втрат зазвичай вирішується для двигуна [2-4], що рухається, в усталених режимах, нехтуючи процесами регулювання магнітного потоку. Такий підхід є розумним для електро-двигунів постійного струму, в якому струм збудження, зазвичай, набагато менший, ніж струм якоря. Для асинхронних двигунів співвідношення струму холостого ходу, що створює магнітне поле, до номінального струму може перевищувати 60%. У цьому випадку знизити теплові втрати у двигуні можна за рахунок розмагнічування двигуна в нерухомому стані з подальшим його намагнічуванням перед наступним циклом руху. Регулювання потокозчеплення ротора здійснюють також за малим навантаженням двигуна, що рухається, задля збільшення його ККД. З наведеного аналізу виникає задача синтезу оптимального закону регулювання потокозчеплення ротора  $\psi_r^*$  з метою мінімізації сумарних втрат в обмотках статора і ротора АД на регулювання потокозчеплення.

У статті [5] запропоновано пошуковий підхід до вирішення цієї проблеми. Така оптимізація вимагає 5-7 тисяч ітерацій із симуляцією перехідного процесу, що виконується під час кожної з них. У роботі [6] представлено порівняння втрат в міді нерухомого АД у разі стрибкоподібної зміни  $\psi_r^*$  за різних обмежень  $i_{sd} \geq i_{sd \max}$  на потокоутворюючу складову струму статора. У [7] здійснено спробу з визначення оптимального режиму керування потокозчепленням ротора нерухомого АД та порівняння втрат тепла у разі оптимального керування та більш простих (лінійний і стрибкоподібний) законах зміни потокозчеплення, але щодо виведення рівняння екстремалі методом Ейлера допущено помилку у визначенні сталої часу оптимального процесу. Внаслідок цього зроблено хибний висновок про те, що залежності втрат від часу керування «мають V-образний вигляд та явно виражений екстремум». У роботі [8] виправлено визначену вище помилку, отримано узагальнені рівняння та графіки залежності втрат за оптимального (синусгіперболічного) керування та знайдено оптимальні значення часів намагнічування і розмагнічування АД у разі лінійного закону зміни потокозчеплення ротора. У роботі [9] також виправлено помилки статті [7], знайдено оптимальний час керування потоко-зчеплення за лінійним законом та побудовано залежності втрат при синусгіперболічному та лінійному законах зміни потокозчеплення, знайдено оптимальні параметри параболічного закону.

© Толочко О.І., Калугін Д.В., 2020

ORCID ID: \*<https://orcid.org/0000-0002-6871-0653>; \*\*<https://orcid.org/0000-0003-1293-4479>

Синусгіперболічний та параболічний закони зміни потокозчеплення ротора зручно використовувати тільки для нерухомого двигуна, коли завдання на усталене значення цієї координати залишається незмінним. Якщо ж завдання на потокозчеплення змінюється у функції електромагнітного моменту та/або швидкості задля оптимізації ККД двигуна, то найбільш зручними є лінійний та експоненціальний закони керування рівнем намагніченості, тому що вони реалізуються шляхом простого включення в канал керування потокозчепленням задатчика інтенсивності або аперіодичної ланки відповідно.

**Метою роботи** є визначення оптимальних параметрів експоненціальних законів розмагнічування та намагнічування, виведення аналітичних виразів для розрахунку мінімально можливих втрат в обмотках АД за умов експоненціального керування та порівняння їх із втратами у разі лінійного керування.

**Матеріали і результати досліджень.** Спрощену структурну схему системи полеорієнтованого векторного керування АД на зупиненому двигуні в обертовій ортогональній системі координат  $dq$ , орієнтованій за вектором потокозчеплення ротора, наведено на рис. 1. У схемі використано такі позначення: РП – регулятор потокозчеплення; КРСd – замкнений контур регулювання  $d$ -складової струму статора;  $\psi_r^*$ ,  $i_{sd}^*$  – сигнали завдання на потокозчеплення ротора та потокоутворюючу складову струму статора;  $\tau_r = L_r / R_r$  – стала часу ротора;  $L_r$ ,  $R_r$  – індуктивність та активний опір ротора;  $k_r = L_m / L_r$  – коефіцієнт магнітного зв'язку ротора;  $\tau_i$ ,  $\tau_\psi$  – сталі часу інтегрування розімкнених контурів струму та потокозчеплення відповідно.

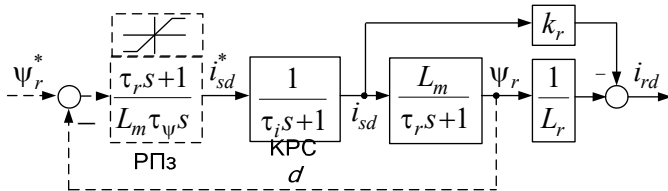


Рис. 1

За прямого керування (DFOC) система складається з контуру потокозчеплення і підпорядкованого йому контуру струму, а у випадку непрямого керування (IFOC) регулятор потокозчеплення відсутній.

Сумарні теплові втрати в обмотках статора і ротора, зумовлені потокоутворюючими складовими струмів статора та

ротора, що підлягають мінімізації, обчислюються за формулою

$$\Delta W = \int_0^{t_f} \Delta P(t) dt = 3 \int_0^{t_f} [R_s I_s^2(t) + R_r I_r^2(t)] dt = \frac{3}{2} \int_0^{t_f} [R_s i_{sd}^2(t) + R_r i_{rd}^2(t)] dt, \quad (1)$$

де  $\Delta P$ ,  $\Delta W$  – потужність та енергія втрат відповідно;  $t_f$  – час закінчення перехідного процесу;  $I_s$ ,  $I_r$  – ефективні значення фазних струмів статора і ротора;  $i_{sd}$ ,  $i_{rd}$  – потокоутворюючі складові струмів статора і ротора, які у разі нерухомого двигуна (за умов  $i_{sq}=0$ ,  $i_{rq}=0$ ) дорівнюють амплітудним значенням цих струмів, внаслідок чого  $i_{sd} = \sqrt{2} I_s$ ,  $i_{rd} = \sqrt{2} I_r$ .

Щоб перейти від двох змінних у рівнянні (1) до однієї, виразимо струми статора та ротора через потокозчеплення ротора та його першу похідну

$$i_{sd}(t) = \frac{1}{L_m} [\psi_r(t) + \tau_r \psi_r'(t)], \quad i_{rd}(t) = \frac{1}{L_r} [\psi_r(t) - L_m i_{sd}(t)] = -\frac{\tau_r}{L_r} \psi_r'(t) = -\frac{\psi_r'(t)}{R_r}. \quad (2)$$

Після підстановки виразів (2) в рівняння (1) та здійснення деяких перетворень отримуємо

$$\Delta P = \frac{3R_s}{2L_m^2} [\psi_r^2 + 2\tau_r \psi_r \psi_r' + \tau_o^2 (\psi_r')^2], \quad \Delta W = \frac{3R_s}{2L_m^2} \int_0^{t_f} [\psi_r^2 + 2\tau_r \psi_r \psi_r' + \tau_o^2 (\psi_r')^2], \quad (3)$$

де

$$\tau_o = \lambda \tau_r, \quad \lambda = \sqrt{(R_s + k_r^2 R_r) / R_s} = \sqrt{1 + k_r^2 R_r / R_s} > 1. \quad (4)$$

Перехідні процеси розмагнічування та намагнічування за експоненціальним законом та їхні похідні описуються рівняннями

$$\psi_{r \text{ exp}}^{\text{розм}}(t) = \psi_{r0} e^{-\Omega_e t}, \quad \psi_{r \text{ exp}}^{\text{нам}}(t) = \psi_{r0} (1 - e^{-\Omega_e t}), \quad (\psi_{r \text{ exp}}^{\text{розм}})'(t) = -\Omega_e \psi_{r0} e^{-\Omega_e t}, \quad (\psi_{r \text{ exp}}^{\text{нам}})'(t) = \Omega_e \psi_{r0} e^{-\Omega_e t}, \quad (5)$$

де  $\psi_{r0} = L_m i_{sd0}$  – потокозчеплення холостого ходу ротора;  $i_{sd0}$  – струм намагнічування;  $\Omega_e = 1/\tau_e$ ,  $\tau_e$  – стала часу експоненти.

Визначимо миттєві та інтегральні втрати для цих випадків підстановкою (5) у рівняння (3)

$$\Delta W_{\text{exp}}^{\text{розм}} = \frac{3}{2} \cdot \frac{R_s \Psi_{r0}^2}{L_m^2} \cdot \left[ 1 - 2\tau_r \Omega_e + \tau_o^2 \Omega_e^2 \right] \int_0^{\infty} e^{-2\Omega_e t} = \frac{\Delta W_c}{2} \left[ \frac{1}{\tau_r \Omega_e} - 2 + \lambda^2 \tau_r \Omega_e \right], \quad \Delta W_c = \frac{3}{2} \cdot \frac{R_s \Psi_{r0}^2 \tau_r}{L_m^2} = \frac{3}{2} R_s i_{sd0}^2 \tau_r; \quad (6)$$

$$\Delta W_{\text{exp}}^{\text{нам}} = \frac{3}{2} \cdot \frac{R_s \Psi_{r0}^2}{L_m^2} \cdot \int_0^{4/\Omega_e} \left[ 1 + 2(\tau_r \Omega_e - 1)e^{-\Omega_e t} + (1 - 2\tau_r \Omega_e + \tau_o^2 \Omega_e^2)e^{-2\Omega_e t} \right] dt.$$

Після інтегрування останнього виразу і перетворень отримуємо

$$\Delta W_{\text{exp}}^{\text{нам}} = \frac{\Delta W_c}{2} \left[ \frac{(5 + 4e^{-4} - e^{-8})}{\tau_r \Omega_e} + 2(1 - 2e^{-4} + e^{-8}) + \lambda^2 \tau_r \Omega_e (1 - e^{-8}) \right]. \quad (7)$$

Для визначення оптимальних сталих часу знаходимо похідні від енергії втрат і прирівнюємо їх до нуля. Після спрощень маємо

$$\Omega_{eopt}^{\text{розм}} = 1/\tau_o, \quad \tau_{eopt}^{\text{розм}} = \tau_o; \quad W_{\text{expopt}}^{\text{розм}} = \Delta W_c (\lambda - 1); \quad (8)$$

$$\tau_{eopt}^{\text{нам}} = \tau_o \sqrt{\frac{1 - e^{-8}}{5 + 4e^{-4} - e^{-8}}} \approx 0.44 \tau_o; \quad W_{\text{expopt}}^{\text{нам}} = \Delta W_c \left[ \lambda \sqrt{(5 + 4e^{-4} - e^{-8})(1 - e^{-8})} + (1 - 2e^{-4} + e^{-8}) \right] \approx \Delta W_c (2.25\lambda + 0.96). \quad (9)$$

У типових системах векторного керування намагнічування і розмагнічування АД здійснюють за стрибкоподібної зміни сигналу  $i_{sd}^*$ . У цьому разі потокозчеплення ротора змінюється за експоненціальним законом зі сталою часу, що дорівнює електромагнітній сталій часу роторного кола  $\tau_r$

$$\Psi_{rer}^{\text{розм}}(t) = \Psi_{r0} e^{-t/\tau_r}, \quad \Psi_{rer}^{\text{нам}}(t) = \Psi_{r0} (1 - e^{-t/\tau_r}). \quad (10)$$

Після підстановки у (3) виразів (10) та їхніх похідних маємо

$$\Delta W_{er}^{\text{розм}} = \Delta W_c (\lambda^2 - 1)/2, \quad \Delta W_{er}^{\text{нам}} = \Delta W_c [7 + e^{-8} + \lambda^2 (1 - e^{-8})]/2 \approx \Delta W_c (\lambda^2 + 7)/2. \quad (11)$$

В роботі [9] таким же чином визначено оптимальні параметри лінійних законів намагнічування та розмагнічування

$$\Psi_{rlin}^{\text{розм}}(t) = \Psi_{r0} (1 - t/t_f), \quad \Psi_{rlin}^{\text{нам}}(t) = \Psi_{r0} t/t_f. \quad (12)$$

Залежності інтегральних втрат (3) для досліджуваного випадку (12) від часу керування запишуться як

$$\Delta W_{lin}^{\text{розм}} = \Delta W_c (\lambda \tau_o / t_f - 1 + \lambda t_f / (3\tau_o)), \quad \Delta W_{lin}^{\text{нам}} = \Delta W_c (\lambda \tau_o / t_f + 1 + \lambda t_f / (3\tau_o)), \quad (13)$$

а мінімум втрат досягається за умови

$$t_f = t_{fopt lin} = \sqrt{3} \cdot \lambda \tau_r = \sqrt{3} \tau_o. \quad (14)$$

Величини мінімізованих втрат складають

$$\Delta W_{lin min}^{\text{розм}} = \Delta W_c (2\lambda/\sqrt{3} - 1), \quad \Delta W_{lin min}^{\text{нам}} = \Delta W_c (2\lambda/\sqrt{3} + 1). \quad (15)$$

Для порівняння розглянутих способів керування потокозчепленням ротора на рис. 2 наведено відповідні графіки перехідних процесів розмагнічування (верхній рядок) та намагнічування (нижній рядок) в нерухомому стані двигуна з параметрами  $P_n = 5$  кВт,  $I_{sn} = 13,5$  А,  $\Psi_{r0} = 1.01$  Вб,  $i_{d0} = 11.88$  А,  $R_s = 1,32$  Ом,  $R_r = 2,34$  Ом,  $L_m = 0,085$  Гн,  $L_r = 0.0867$  Гн,  $k_r = 0.98$ ,  $\tau_r = 0.037$  с,  $\lambda = 1.64$ ,  $\tau_o = 0.061$  с,  $\tau_i = 0,4$  мс,  $\tau_\psi = 2\tau_i$ ,  $\Delta W_c = 10.36$  Дж: а) загально прийняте експоненціальне керування; б) експоненціальне керування з оптимальною сталою часу; в) лінійне керування з оптимальною тривалістю процесів.

Формули для розрахунку втрат у представлених режимах та числові результати зведені у таблицю. Представлені графіки та дані таблиці підтверджують правильність знайдених аналітичних виразів. З порівняльного аналізу перехідних процесів видно, що у випадку розмагнічування найменші теплові втрати (3) забезпечуються за експоненціальним законом з оптимальним значенням сталої часу (8), а у разі намагнічування – за лінійним з оптимальною тривалістю перехідного процесу (14). Але якщо врахувати сумарні втрати щодо намагнічування та розмагнічування, то вони є мінімальними за лінійним законом керування потокозчепленням (для досліджуваного двигуна ці втрати виявляються у 1.5 рази менше, ніж у загальноприйнятому керуванні). Перевагою лінійного закону над експоненціальним з оптимальними параметрами є однакові значення параметрів під час розмагнічування та намагнічування.

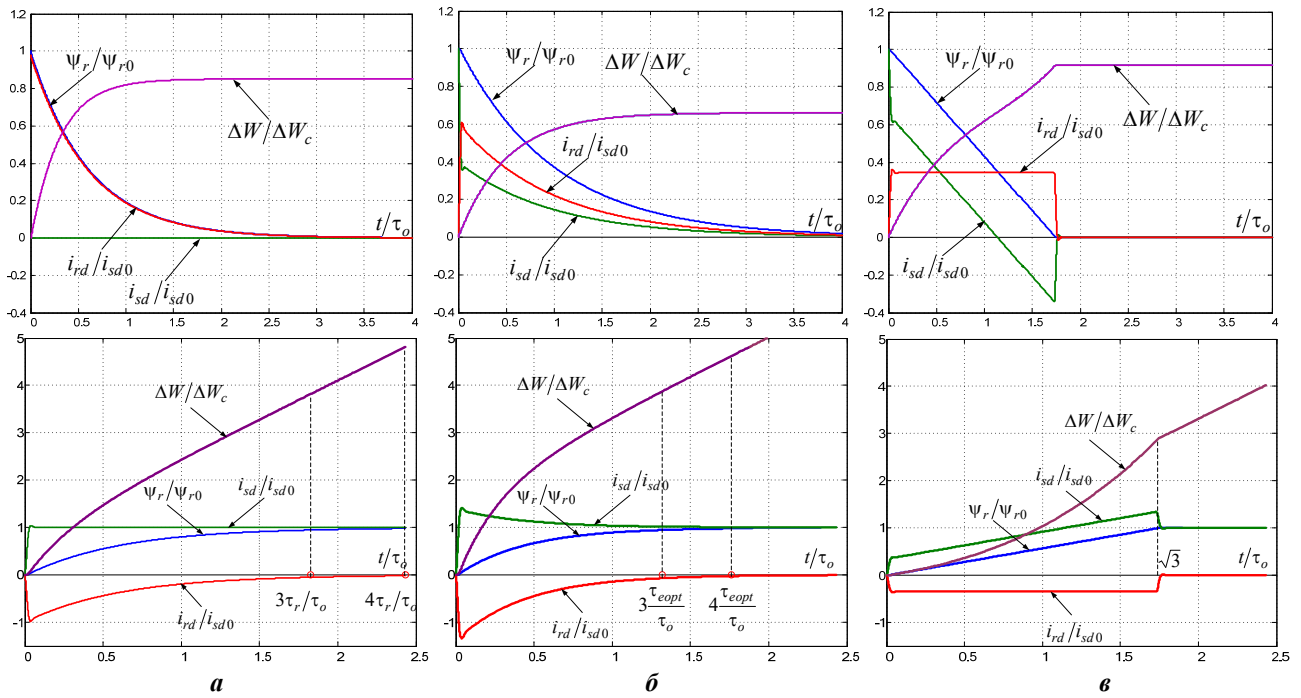


Рис. 2

Відносні втрати $\Delta W/\Delta W_c$			
Режим \ Закон	Експоненціальний, $\tau_e = \tau_r$	Експоненціальний $\tau_e = \tau_{eopt}$	Лінійний $t_f = t_{f linopt}$
Розмагнічування	$(\lambda^2 - 1)/2 = 0.85$	$\lambda - 1 = 0.64$	$2\lambda/\sqrt{3} - 1 = 0.89$
Намагнічування	$(\lambda^2 + 7)/2 = 4.85$	$2.25\lambda + 0.96 = 4.65$	$2\lambda/\sqrt{3} + 1 = 2.89$
Разом	$\lambda^2 + 3 = 5.7$	$3.25\lambda - 0.04 = 5.29$	$4\lambda/\sqrt{3} = 3.78$

### Висновки.

У роботі досліджено експоненціальний та лінійний закони керування потокозчепленням ротора з параметрами, що забезпечують мінімум теплових втрат у статорі та роторі від потокоутворюючих складових струмів векторно-керованого асинхронного двигуна. Щодо керування станом намагніченості нерухомого двигуна доцільно намагнічувати його за лінійним законом, а розмагнічувати – за експоненціальним з оптимальними параметрами. Але у разі керування цим процесом у випадку руху АД краще застосовувати лінійний закон, тому що, по-перше, він забезпечує менші втрати для намагнічування, які є значно більшими, ніж втрати під час розмагнічування, і, по-друге, оптимальні параметри лінійного закону є однаковими у випадках зменшення та збільшення потокозчеплення. Економічна ефективність оптимального керування потокозчепленням залежить від потужності електроприводу та режиму його роботи і потребує подальших досліджень.

1. Diachenko G.G., Aziukovskiy O.O. Review of methods for energy-efficiency improvement in induction machines. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2020. No 1. Pp. 80-88.
2. Borisevich A. Numerical method for power losses minimization of vector-controlled induction motor. *International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS)*. 2015. Vol. 6. No 3. Pp. 486-497.
3. Seena T., Rinu A.K. Efficiency optimization with improved transient performance of indirect vector controlled induction motor drive. *International Journal of advanced research in electrical, electronics and instrumentation engineering*. 2013. Vol. 2. Pp. 374-385.
4. Blanuša B.D., Dokic B.L. Vukosavic S.N. Efficiency optimized control of high performance induction motor drive. *Electronics*. 2009. Vol. 13, No 2. Pp. 8-13.
5. Braslavsky I.A., Kostyliev A.V., Stepaniuk D.P. Optimization of Starting Process of the Frequency Controlled Induction Motor. 13th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE-PEMC-2008). Poznan, Poland, 2008. Pp. 1050-1053.

6. Tolochko O.I., Rozkaryaka P.I., Chekavskii G.S., Kuzhel A.K. Control of induction motor magnetization and demagnetization processes in field-oriented control systems. *Electromechanical and energy saving systems. Quarterly scientific and industrial journal*. 2011. Vol. 3(15). Pp. 79-82 (Rus).
7. Volkov V.A. Optimization of magnetization and demagnetization modes in frequency-controlled induction motor. *Electrotechnica and energetica. Scientific proceedings of DonNTU*. 2013. Vol. 2. Pp. 59-66 (Rus).
8. Tolochko O., Sopiha M. Heat loss minimization field control of motionless induction motors in pause of intermittent duty. IEEE First Ukraine Conference on *Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*. Kyiv, Ukraine, 2017. Pp. 442-447.
9. Volkov V.A. Optimization of magnetization and demagnetization times of a stopped frequency-controlled induction motor. *Elekrotekhnika i elektrichestvo*. 2018. No. 4. Pp. 17-29 (Rus).  
DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2018-4-2>

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ НАМАГНИЧИВАНИЯ И РАЗМАГНИЧИВАНИЯ ВЕКТОРНО-УПРАВЛЯЕМОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

**О.И. Толочко**, докт. техн. наук, **Д.В. Калугин**  
 НТУ Украины «Киевский политехнический институт им. И. Сикорского»,  
 пр. Победы, 37, Киев, 03056, Украина,  
 e-mail: [tolochko.ola@gmail.com](mailto:tolochko.ola@gmail.com)

*Найдены оптимальные постоянные времени экспоненциальных законов намагничивания и размагничивания векторно-управляемого асинхронного двигателя, при которых обеспечивается минимизация тепловых потерь от потокообразующих компонент токов статора и ротора, приведены формулы для расчета этих потерь. Выполнено сравнение исследуемых процессов при общепринятом и оптимальном управлении по экспоненциальному и линейному законам методом математического моделирования. Библ. 9, рис. 2, табл. 1.*

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель, размагничивание, намагничивание, оптимизация.

## OPTIMIZATION OF MAGNETIZATION AND DEMAGNETIZATION PROCESSES OF THE VECTOR CONTROLLED ASYNCHRONOUS MOTOR

**O.I. Tolochko, D.V. Kaluhin**  
 National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”,  
 pr. Peremogy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine  
 e-mail: [tolochko.ola@gmail.com](mailto:tolochko.ola@gmail.com)

*It was found the optimal time constants of the exponential laws of magnetization and demagnetization for induction motor with vector-control. It allows minimizing heat losses from field components of the stator and rotor currents. In addition, formulas for calculating these losses are found. Comparison of processes with standard and optimal control laws according to exponential and linear laws by the method of mathematical modeling is performed. References 9, figures 2, table 1.*

**Keywords:** induction motor, demagnetization, magnetization, optimization.

Надійшла 28.02.2020  
 Остаточний варіант 17.04.2020

## ЗАДАЧА РОЗТАШУВАННЯ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ОЕС УКРАЇНИ З УРАХУВАННЯМ ЙОГО ВПЛИВУ НА ПОТОКИ ПОТУЖНОСТІ КОНТРОЛЬОВАНИМИ ПЕРЕТИНАМИ

О.Ф. Буткевич<sup>1,2\*</sup>, докт. техн. наук, Н.Т. Юнєсва<sup>1</sup>, канд. техн. наук, Т.М. Гурєєва<sup>1</sup>,  
П.І. Стецюк<sup>3\*\*</sup>, докт. фіз.-мат. наук

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

пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна, e-mail: [butkevych@ied.org.ua](mailto:butkevych@ied.org.ua)

<sup>2</sup> НТУ України «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського»,

пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна.

<sup>3</sup> Інститут кібернетики НАН України ім. В.М. Глушкова,

пр. Академіка Глушкова, 40, Київ, 03187, Україна.

*Показано, що під час створення в об'єднаній енергосистемі (ОЕС) України системи накопичувачів електроенергії (ННН) доцільно враховувати вплив розподілу (за місцем та потужністю) батарей ННН на потоки активної потужності «проблемними» контрольованими перетинами ОЕС України. Запропоновано метод визначення розподілу ННН з урахуванням зазначеного впливу. Бібл. 3, табл. 1.*

**Ключові слова:** об'єднана енергосистема, відновлювані джерела енергії, розташування накопичувачів електроенергії

**Характеристика проблеми.** Широке впровадження в електричних мережах об'єднаної енергосистеми (ОЕС) України відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), інтенсифіковане економічними перевагами «зеленої» генерації, окрім практичної реалізації планів щодо розвитку безвуглецевої енергетики, з одного боку, призвело до виникнення нових та загострення існуючих проблем з іншого. Задля швидкого балансування стохастичних змін потужності ВДЕ (тут і далі під ВДЕ розумітимемо лише сонячні та вітрові електростанції) необхідно мати додаткові маневрені (маневрові) потужності, спроможні забезпечити таке балансування. Як зазначено у звіті [1], в Україні до 2025 року передбачається побудувати до 2,5 ГВт високоманеврених балансуєчих потужностей: 2 ГВт – потужність газопоршневих електростанцій та 500 МВт – потужність системи накопичувачів електроенергії (СННН), і перші 200 МВт СННН планувалося ввести внаслідок виконання відповідного пілотного проекту. Однак 12.12.2019 р. під час проведення Energy Discussion Platform [2] було повідомлено, що, на відміну від попередніх планів, викладених у звіті [1], де за пілотним проектом передбачалося 3 варіанти створення СННН, ПрАТ «НЕК «Укренерго» планує розглядати лише два варіанти реалізації цього проекту: 1-й – встановлення однієї СННН потужністю 200 МВт, 2-й – встановлення 5 СННН потужністю 40 МВт кожна. Також було повідомлено, що потреби ОЕС України у потужності СННН протягом 2021-2030 рр. зростуть до 2200 МВт.

Зупинимося на питанні впливу окремих чинників на вибір варіанту створення СННН в ОЕС України. Оскільки ПрАТ «НЕК «Укренерго» 29.10.2019 р. у Маріуполі вже підписала меморандум з Європейським банком реконструкції та розвитку про спільну реалізацію проекту Battery Energy Storage system, бюджет якого становить €122 млн. (для позначення Battery Energy Storage system використовуватимемо введену вище аббревіатуру СННН), то із завершенням першого етапу пілотного проекту зі створення СННН в ОЕС України (на якому передбачено *підготовку техніко-економічного обґрунтування для подальших робіт*) далі заплановано визначення вартості проекту та створення моделі СННН і відповідної *дорожньої карти*, тому вибір варіанту проекту стає першочерговою задачею.

Вартість створення СННН, очевидно, може суттєво відрізнитися для різних варіантів реалізації проекту. Однак їхнє оцінювання не повинно базуватися лише на прямому визначенні витрат, мають братися до уваги також впливи чинників, що оцінюються в інших шкалах. Значущість таких впливів



на показники режимів функціонування ОЕС України (не обмежуючись лише вимогами до балансування стохастичних змін потужності ВДЕ) слід попередньо оцінити, щоб з'ясувати потребу їхнього урахування під час визначення оптимального варіанту створення СНЕЕ. Один із таких чинників, який слід брати до уваги, стосується впливу розподілу батарей накопичувачів електроенергії (НЕЕ) на потоки потужності контрольованими перетинами ОЕС України.

**Мета роботи** – показати, що розподіл накопичувачів електроенергії може суттєво впливати на потоки потужності контрольованими перетинами ОЕС України внаслідок їхнього ввімкнення задля балансування стохастичного зменшення потужності ВДЕ, і запропонувати метод визначення розподілу НЕЕ задля досягнення бажаного впливу на потоки потужності «проблемними» контрольованими перетинами, запобігаючи їхньому переобтяженню.

**Особливості розв'язання задачі.** Зазначимо обставини, які вказують на те, що вплив варіантів такого розподілу на потоки потужності контрольованими перетинами ОЕС України, здавалося б, можна априорі не враховувати: 1) системотвірна електрична мережа здатна «пропускати» значно більші потоки потужності ніж ті, що мають місце в період зимового максимуму електроспоживання в останні роки, і, у загальному випадку, запаси статичної аперіодичної стійкості з активної потужності у контрольованих перетинах ОЕС України наразі вищі від нормативних; 2) СНЕЕ потужністю 200 МВт (порівняна з потужністю одного із 12-ти блоків Бурштинської ТЕС) не матиме суттєвого впливу на запаси статичної аперіодичної стійкості з активної потужності у контрольованих перетинах ОЕС України. Однак, не дивлячись на це, слід брати до уваги, що і за таких режимів ОЕС України існують «проблемні» перетини, і недостатня пропускна спроможність її внутрішніх перетинів може також зумовлювати суттєві обмеження потоків потужності міждержавними перетинами, наприклад, перетином з ЕЕС Молдови. Тобто, проблема недостатньої пропускної спроможності окремих внутрішніх перетинів ОЕС України (відповідно і забезпечення нормативних запасів статичної аперіодичної стійкості з активної потужності) не зникла. На відміну від введення нових потужностей на існуючих електростанціях, створення СНЕЕ априорі не обмежено «прив'язкою» до певних об'єктів і може відбуватися з урахуванням впливу розподілу НЕЕ на потоки потужності контрольованими перетинами, щоб забезпечити бажану зміну потоків активної потужності заданими перетинами (наприклад, обраними серед «проблемних») після ввімкнення НЕЕ. Якщо не брати до уваги цю обставину, то невдалий (в аспекті зазначеного впливу) розподіл НЕЕ може призводити до додаткового навантаження «проблемних» перетинів після ввімкнення НЕЕ. Урахування впливу розподілу (за місцем та потужністю) НЕЕ в ОЕС України не перешкоджає урахуванню інших чинників під час визначення оптимального варіанту створення СНЕЕ. Тут слід зауважити, що режими ОЕС України в перспективі зазнаватимуть змін (внаслідок як структурних змін в ОЕС України, так і зміни обсягів електроспоживання), і на поточний час відповідні прогностичні оцінки значною мірою є наближеними. Тому під час розв'язання задачі розподілу НЕЕ, враховуючи «проблемні» перетини ОЕС України, доцільно, очевидно, орієнтуватися на перспективний режим максимальних навантажень та нормальну схему електричних з'єднань ОЕС України. Щоб уникнути певних термінологічних непорозумінь, далі використовуватимемо прикметник *заданий* як «маркер» для контрольованих перетинів ОЕС України, *бажаних* змін потоків активної потужності яких внаслідок ввімкнення НЕЕ потрібно досягти. Виходячи із зазначених вище мети та умов розв'язання задачі, наведемо її загальну постановку у вербальній формі.

*Визначити об'єкти ОЕС України та загальну потужність НЕЕ, які слід встановити на таких об'єктах для бажаної зміни потоків активної потужності заданими перетинами ОЕС України внаслідок ввімкнення НЕЕ задля балансування стохастичних змін потужності ВДЕ. Значення режимних параметрів ОЕС України мають знаходитися в допустимих (заданих) межах.*

Відразу відмітимо, що повністю бажаної зміни потоків потужності не завжди можна досягнути, враховуючи потужність СНЕЕ, режимні обмеження та обмеження щодо кількості об'єктів для розташування НЕЕ. Розв'язання цієї задачі пов'язано, насамперед, з аналізом чутливості потоків активної потужності заданими перетинами по відношенню до флуктуацій активної потужності вузлів – претендентів на розташування НЕЕ (далі – *вузлів-претендентів*), множина яких попередньо експертно визначається. Проблеми чутливості електроенергетичних систем (ЕЕС) присвячено значну кількість праць. Постановка даної задачі має свої особливості. Наприклад, на відміну від потреби визначення *сенсорних* елементів схеми електромережі (елементів, параметри режиму яких зазнають найбільших змін за випадкових флуктуацій вузлових навантажень та топологічних змін вказаної схеми) в усталених режимах [3], у даній задачі склад кожного із *заданих* перетинів априорі відомий, до того ж про «сенсорність» ЛЕП таких перетинів взагалі не йдеться. Слід також відмітити, що підхід, запропо-

нований у [3], дає змогу одержати об'єктивні оцінки лише в межах збереження лінійності між збудженнями (у вигляді флуктуацій потужності навантажень) та відповідними реакціями ЕЕС за умови помітної неоднорідності електричної мережі. Певною мірою можна вважати, що у нашому випадку спочатку маємо справу з «умовно оберненою» задачею, оскільки визначати слід не сенсорні елементи мережі, а вузли, збільшення активної потужності яких призводитиме до *бажаної* зміни потоків активної потужності *заданим* перетином. Дещо складніше забезпечити *бажану* зміну *сальдо* потоків потужності перетином, тому далі розглянемо задачу саме у такій постановці.

Формалізуємо задачу визначення розподілу НEE з метою досягнення *бажаної* зміни сальдо потоків активної потужності *заданим* (*i*-им) перетином у вигляді

$$F_i \rightarrow \min, \quad (1)$$

$$F_i = |P_i(X) - P_{id}|, \quad \text{якщо } \text{sign} P_i = \text{sign} P_{id}; \quad (2)$$

$$F_i = |P_i(X) + P_{id}|, \quad \text{якщо } \text{sign} P_i \neq \text{sign} P_{id}; \quad (3)$$

$$X \supset W_{on}; \quad W = [W_{on} \quad W_{off}]^T; \quad W = [w_1 \quad w_2 \quad \dots \quad w_q]^T; \quad (4)$$

$$P_j \leq P_{jlim}, \quad j = \overline{1, n_j}; \quad n_j \geq k,$$

де  $F_i$  – цільова функція,  $i = \overline{1, k}$ ,  $k$  – кількість *заданих* перетинів;  $P_i, P_{id}$  – сальдо розрахункових потоків активної потужності *i*-м *заданим* перетином та його *бажане* значення відповідно;  $X$  – вектор параметрів режиму, до якого входить і частина потужностей НEE ( $W_{on}$ ), вже розподілених за *вузлами-претендентами*;  $W$  – вектор потужностей *вузлів-претендентів*, окремі елементи якого в процесі розподілу потужностей НEE утворюють субвектор  $W_{on}$ , а інші – субвектор нульових елементів  $W_{off}$ ;  $q$  – кількість *вузлів-претендентів*;  $n_j$  – кількість контрольованих перетинів ОЕС України, сальдо потоків активної потужності яких ( $P_j$ ) не мають перевищувати заданих значень  $P_{jlim}$  (одночасно з (4) подібні обмеження можуть стосуватися окремих ЛЕП перетинів).

Під час визначення оптимального розподілу НEE крім обмежень (4) контролюється також виконання умов

$$U_{smin} \leq U_s \leq U_{smax}, \quad s = \overline{1, m_s}, \quad (5)$$

$$I_r \leq I_{rmax}, \quad r = \overline{1, m_r}, \quad (6)$$

де  $m_s$  – кількість вузлів, для кожного ( $s$ -го) з яких значення напруги ( $U_s$ ) має перебувати у допустимих межах;  $m_r$  – кількість ЛЕП, для кожної ( $r$ -ї) з яких розрахункова сила струму ( $I_r$ ) не має перевищувати максимально допустимого значення за термічною стійкістю дротів ЛЕП ( $I_{rmax}$ ).

Враховуючи проблематичність одержання аналітичних залежностей сальдо потоків потужності *заданих* перетинів від активної потужності *вузлів-претендентів* (передбачається потужність НEE), але маючи програмні засоби моделювання режимів ЕЕС як режимів, що самовстановлюються (частота є розрахунковим параметром), задля визначення чутливості зазначених сальдо до зміни активної потужності *вузлів-претендентів* використано чисельне диференціювання

$$\partial P_i(X) / \partial W = [\Delta P_i(X) / \Delta w_1 \quad \Delta P_i(X) / \Delta w_2 \quad \Delta P_i(X) / \Delta w_3 \quad \dots \quad \Delta P_i(X) / \Delta w_q]^T, \quad i = \overline{1, k}.$$

Беручи до уваги призначення та умови експлуатації СНEE, вважаємо, що розташовувати її доцільно в розподільних електромережах напругою 110 (150) кВ.

**Результати виконаних досліджень.** Наведемо деякі результати досліджень із застосуванням запропонованого методу. Для досліджень було використано режим ОЕС України, одержаний на базі режиму максимальних навантажень 2016 р., зокрема було введено (модельовано) значні додаткові потужності ВДЕ на півдні України. Попередньо в мережі 110 (150) кВ ОЕС України було відібрано 90 *вузлів-претендентів*. Ілюстративний фрагмент даних (значний обсяг усіх даних не дає змогу їх тут навести) – коефіцієнтів чутливості сальдо потоків активної потужності окремими контрольованими перетинами ОЕС України до зміни активної потужності *вузлів-претендентів* наведено у таблиці (знак мінус вказує на зменшення за абсолютним значенням сальдо потоків потужності за збільшенням потужності НEE у відповідному *вузлі-претенденті*).

Задля досягнення *бажаної* зміни сальдо потоків потужності окремим *заданим* перетином використовується алгоритм, за яким покроково збільшується потужність НEE, починаючи з «найвпливовішого» вузла (такий вузол обирається на підставі визначення коефіцієнтів чутливості, приклад яких наведено у таблиці). З урахуванням потужності НEE моделюється режим ОЕС України і контролюється виконання обмежень (4)-(6) (передбачена також можливість контролювання потоків активної

потужності окремими заданими ЛЕП). Якщо заданих перетинів декілька, то розподіл потужності НEE відбувається послідовно (за пріоритетністю перетинів). Перехід до чергового перетину відбувається тоді, коли можливості бажаної зміни сальдо потоків потужності для поточного заданого перетину вичерпано. Розподілені НEE залишаються «ввімкненими» під час моделювання режимів, а нерозподілена частина потужності СНEE використовується для розподілу з переходом до чергового заданого перетину. Можлива також така постановка задачі: досягти бажаних змін сальдо потоків потужності одночасно для двох заданих перетинів, надаючи пріоритетність одному із них.

Перетини	Найменування вузлів-претендентів – електричних підстанцій номінальної напруги 110 (150) кВ									
	Чер- каси	Шев- ченко	Коно- топ	Миро- пілля	Поляна	Жито- мир	Брова- ри	Кремен- чук	Харків	Шос- тка
ОЕС Укр.– Київ	-0,59	-0,64	0,17	-0,67	-0,60	-0,49	-0,40	0,09	0,06	0,15
<b>Дніпро – ЮУ АЕС</b>	<b>-0,28</b>	<b>-0,28</b>	0,29	-0,10	-0,27	-0,002	-0,1	0,19	0,17	<b>0,79</b>
<b>ЮУ АЕС– Дніпро</b>	<b>-0,03</b>	<b>-0,02</b>	-0,42	0,98	-0,02	0,47	0,52	-0,26	-0,15	<b>-0,36</b>
Вінниця – ЮУ АЕС	-0,11	-0,11	-0,22	-0,09	-0,10	0,29	0,33	-0,15	-0,08	-0,19
ОЕС Укр.– Одеса, Мо- лдова	0,06	0,06	0,03	0,05	0,06	0,05	0,03	0,03	0,02	0,02

Зауважимо, що за останньої постановки задачі досягти бажаного результату не завжди можливо, особливо у разі встановлення обмеження на кількість вузлів для розташування НEE (такі обмеження мають місце у варіантах реалізації проекту зі спорудження СНEE, які передбачає розглядати ПрАТ «НЕК «Укренерго»).

Задля ілюстрації зазначеного розглянемо два перетини: «Дніпро – Южно-Українська АЕС» (його утворюють одна ЛЕП 750 кВ Дніпровська-ЮУАЕС та 8 ЛЕП 330 кВ: Конотоп-Ніжин, КремГЕС-Черкаси, Рудна-Українка, Рудна-Кварцит, КрТЕС-Трихати, КахГПП-Херсон, Чернігів-Гомель, ЧАЕС-Мозир) та «Южно-Українська АЕС – Дніпро» (його утворюють одна ЛЕП 750 кВ ЮУАЕС-Дніпровська та 8 ЛЕП 330 кВ: Ніжин-Конотоп, ТпТЕС-Канів, ЮУАЕС-Кварцит, ЮУАЕС-Українка, Трихати-КрТЕС, Трихати-Миколаїв, Чернігів-Гомель, ЧАЕС-Мозир).

П'ять із дев'яти ЛЕП, що входять до складу цих перетинів, є спільними для обох перетинів (їх виділено курсивом). Розглянемо результати розподілу 200 МВт потужності НEE задля зменшення (за абсолютним значенням) сальдо потоків активної потужності обома цими перетинами з наданням пріоритетності одному із них (у даному випадку пріоритетність було надано перетину «Южно-Українська АЕС – Дніпро») за умови, що для розташування НEE має бути використано обмежену кількість вузлів, наприклад, не більше трьох.

У модельованому режимі ОЕС України до розподілу НEE сальдо потоків активної потужності перетинами «Дніпро – Южно-Українська АЕС» та «Южно-Українська АЕС – Дніпро» становило відповідно -824,4 МВт та -195,3 МВт. Аналіз коефіцієнтів чутливості сальдо потоків потужності до зміни активної потужності вузлів-претендентів виявив, що в аспекті поставленого завдання переважна більшість із них не придатна для розміщення НEE, оскільки останні матимуть діаметрально протилежні впливи на сальдо потоків потужності зазначеними перетинами (прикладом таких вузлів є Шостка, відповідні коефіцієнти чутливості, що мають протилежні знаки, наведено в останньому стовпчику таблиці). Серед небагатьох вузлів, що «претендували» на розміщення НEE, було обрано Черкаси, Шевченко та Знамянку (для перших двох коефіцієнти чутливості наведено в таблиці). Внаслідок розподілу потужності СНEE (200 МВт) з урахуванням заданих обмежень та пріоритетності перетину «Южно-Українська АЕС – Дніпро» сальдо потоків активної потужності цим перетином стало рівним -40,6 МВт. Тобто бажане зменшення (за абсолютною величиною) сальдо потоків потужності склало 155 МВт. Разом з тим, сальдо потоків активної потужності перетином «Дніпро – Южно-Українська АЕС» стало рівним -834,4 МВт, тобто за абсолютною величиною сальдо не зменшилося, а трішки збільшилося (на 10 МВт). Модельований режим ОЕС України із розподіленими та ввімкненими НEE, за результатами поточкорозподілу в якому розраховано сальдо потоків активної потужності перетинами, одержано для значень потужності НEE у вузлах, «округлених» до десятків (відповідно до практи-

ки спорудження енергосховищ з використанням НЕЕ). Встановлена потужність НЕЕ у вузлах *Шевченко, Черкаси та Знам'янка* склала відповідно 100, 80 та 20 МВт.

**Висновки.** Під час реалізації проєкту зі створення СНЕЕ (Battery Energy Storage system) в ОЕС України доцільно враховувати вплив розподілу (за місцем та потужністю) НЕЕ на потоки активної потужності «проблемними» контрольованими перетинами ОЕС України. Запропоновано метод визначення розподілу НЕЕ в ОЕС України з урахуванням його впливу на потоки потужності *заданими* перетинами. Задля досягнення розподілом НЕЕ максимально можливого *бажаного* результату кількість місць для розташування НЕЕ апіорі не слід жорстко обмежувати.

*Роботу виконано за рахунок коштів бюджетної програми «Нова енергетика» (КПКВК 6541030).*

1. 2018 Non-Financial Report “10 steps towards Europe”. State enterprise National power company Ukrenergo.

URL: [https://ua.energy/wp-content/uploads/2019/07/UE\\_NFR\\_2018\\_Eng.pdf](https://ua.energy/wp-content/uploads/2019/07/UE_NFR_2018_Eng.pdf) (accessed: 04.03.2020)

2. Energy storage Ukraine 2020: first projects, steps, and challenges. Discussion Platform 12 December 2019.

URL: <https://mim.kiev.ua/events/view/energy-storage-ukraine-2020-persh-proekti-kroki-ta-vikliki> (accessed: 09.01.2020).

3. Gamm A.Z., Golub I.I. Sensors and weaknesses in power systems. Irkutsk: Melentiev Energy Systems Institute of the Siberian Branch of the RAS, 1996. 96 p. (Rus.)

УДК 621.311 + 621.3.001.57

## **ЗАДАЧА РАЗМЕЩЕНИЯ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ОЭС УКРАИНЫ С УЧЕТОМ ЕГО ВЛИЯНИЯ НА ПОТОКИ МОЩНОСТИ КОНТРОЛИРУЕМЫМИ СЕЧЕНИЯМИ**

**А.Ф. Буткевич<sup>1,2</sup>**, докт. техн. наук, **Н.Т. Юнеева<sup>1</sup>**, канд. техн. наук, **Т.М. Гуреева<sup>1</sup>**,

**П.И. Стецюк<sup>3</sup>**, докт. ф.-м. наук

<sup>1</sup>Институт электродинамики НАН Украины,

пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина, e-mail: [butkevych@ied.org.ua](mailto:butkevych@ied.org.ua)

<sup>2</sup>НТУ Украины «Киевский политехнический институт им. И. Сикорского»,

пр. Победы, 37, Киев, 03056, Украина.

<sup>3</sup>Институт кибернетики НАН Украины им. В.М. Глушкова,

пр. Академика Глушкова 40, Киев, 03187, Украина.

*Показано, что при создании в объединенной энергосистеме (ОЭС) Украины системы накопителей электроэнергии (НЭЭ) целесообразно учитывать влияние распределения (по месту и мощности) батарей НЭЭ на потоки активной мощности «проблемными» контролируемыми сечениями ОЭС Украины. Предложен метод определения распределения НЭЭ с учетом указанного влияния. Библ. 3, табл. 1.*

**Ключевые слова:** объединенная энергосистема, возобновляемые источники энергии, размещение накопителей электроэнергии

## **THE PROBLEM OF ELECTRIC POWER STORAGES' PLACEMENT IN THE IPS OF UKRAINE TAKING INTO ACCOUNT ITS INFLUENCE ON THE POWER FLOWS TRANSMITTED BY CONTROLLED CUTSETS**

**O.F. Butkevych<sup>1,2</sup>**, **N.T. Yunieieva<sup>1</sup>**, **T.M. Hurieieva<sup>1</sup>**, **P.I. Stetsyuk<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,

Peremohy avenue, 56, Kyiv, 03057, Ukraine, e-mail: [butkevych@ied.org.ua](mailto:butkevych@ied.org.ua)

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

Peremohy avenue, 37, Kyiv, 03056, Ukraine

<sup>3</sup>Glushkov Institute of Cybernetics of the National Academy of Sciences of Ukraine,

Glushkov avenue, 40, Kyiv, 03187

*It is shown that when creating of electric energy storage system (EESS) in the Interconnected Power System (IPS) of Ukraine it is advisable to take into account the influence of the distribution (considering both location and power) of EESS batteries on the flows of active power transmitted by “problematic” controlled cutsets of the IPS of Ukraine. The method for solving the EESS distribution’s problem taking into account the specified influence is proposed. References 3, table 1.*

**Key words:** interconnected power system, renewable energy sources, electric energy storages’ placement

Надійшла 28.02.2020  
Остаточний варіант 12.05.2020

## ВИКОРИСТАННЯ ПОНЯТТЯ КОЕФІЦІЄНТУ ПОТУЖНОСТІ ЗАДЛЯ ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРИСТРОЇВ КОРИГУВАННЯ ПЕРЕХІДНИХ РЕЖИМІВ МЕРЕЖІ

О.І. Чиженко, докт.техн.наук, О.М. Попович\*, докт.техн.наук, І.В. Трач\*\*, канд.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), [popovich1955@ukr.net](mailto:popovich1955@ukr.net), [igor.trach@ied.org.ua](mailto:igor.trach@ied.org.ua), [rybina@i.ua](mailto:rybina@i.ua)

*Обґрунтовано поширення поняття коефіцієнта потужності, який визначено для кіл з періодичними напругою та струмами, на трифазні кола з несиметричними неперіодичними напругою та струмами. Показано, що це поняття є доцільним як у разі розгляду перехідних процесів, що виникають в електричних мережах у режимах пуску потужних асинхронних машин, так і у разі порівняльній оцінці ефективності застосування технічних пристроїв коригування цих режимів. Бібл. 6, рис. 2.*

**Ключові слова:** коефіцієнт потужності, кола несиметричних неперіодичних напруги та струмів, оцінка ефективності засобів корекції режимів електричної мережі

**Вступ.** В промислових трифазних симетричних електричних колах періодичних напруги та струму у разі комутації потужного обладнання, яке входить до їхнього складу, виникають важкі перехідні процеси, котрі супроводжуються виникненням несиметрії за фазами напруги та струмів. Ці напруга і струми, аж до часу встановлення у колі сталого режиму, є неперіодичними. У випадках, коли такі перехідні процеси є тривалими і спроможними нанести шкоду іншому обладнанню кола, з метою проведення технічних заходів щодо їхнього коригування виникає потреба в критеріях, які характеризують протікання цих процесів з енергетичної точки зору, а саме, оцінки супроводжуваних ці процеси втрат електроенергії, перевищень номінальних значень напруги та струму або недопустимих їхніх просідань. Використання з такою метою існуючих критеріїв не надає достатньої інформації для проведення ефективних технічних заходів коригування. Тому розробка та введення у розгляд нових, що більш повно та адекватно характеризують перехідні процеси, критеріїв є актуальною задачею.

Оцінка енергетичних показників перехідного процесу, зокрема, є актуальною у електричних мережах з потужним вузловим комплексним навантаженням, що містить електромеханічну складову, наприклад, потужні асинхронні машини (АМ). Прямий пуск таких машин супроводжується пусковими струмами, які у 5-7 разів перевищують їхні номінальні струми у сталому режимі. Пускові струми, тривалість яких вимірюється десятками періодів живлячої напруги, здатні зашкодити встановленому у мережі обладнанню, а також суттєво ускладнити функціонування суміжних споживачів електроенергії, оскільки ці струми спричиняють значні просідання напруги в місцях підключення споживачів до мережі.

Для оцінки енергетичних показників електромеханічних систем відомі дослідження наведені у роботах [1, 2], а стосовно перехідних режимів в них – у роботах О.М. Поповича, де розроблено методологію розрахунку коефіцієнта потужності у перехідних процесах в припущенні незмінності симетричної синусою живлячої напруги. Таке припущення не відповідає процесам у разі пуску в мережі потужних АМ, тому що не враховує падіння напруги у лінії передачі мережі за таких режимів.

**Мета роботи** – визначення та дослідження нового ефективного критерію для характеристики з енергетичної точки зору перехідних процесів, що відбуваються у трифазних електричних колах, який надає достатньо інформації про енергетичні аспекти цих процесів задля розробки технічних заходів та засобів їхнього коригування, а також передбачає порівняльну оцінку ефективності застосування тих чи інших коригуючих пристроїв.

В електричних колах елементарна робота, що виконується електромагнітним полем, визначається як  $dA=uidt$ , де  $u$  та  $i$  – миттєві значення напруги і струму, які описуються довільними часовими залежностями  $u(t)$  та  $i(t)$ . Тоді робота, яка виконується в колі за деякий проміжок часу  $t_{\text{тек}}$

$$A(t_{\text{тек}}) = \int_0^{t_{\text{тек}}} u(t)i(t)dt. \quad (1)$$

У теоретичній електротехніці розглядають середнє значення роботи за час  $t_{\text{тек}}$

$$A_{\text{срп}}(t_{\text{тек}}) = \frac{A(t_{\text{тек}})}{t_{\text{тек}}} = \frac{1}{t_{\text{тек}}} \int_0^{t_{\text{тек}}} u(t)i(t)dt. \quad (2)$$

У випадку періодичних напруги і струмів, тобто коли мають місце рівності  $u(t)=u(t+nT)$ ,  $i(t)=i(t+nT)$ , де  $n=1,2,3,\dots$ ;  $T$  – період цих часових функцій, величина  $A_{\text{срп}}(nT)=\text{const}$ . Цю величину називають середньою за період потужністю  $P_{\text{срп}}$  чи просто активною потужністю  $P$ . Таким чином, для періодичних напруги та струмів маємо

$$P = P_{\text{срп}} = \frac{A(nT)}{nT} = \frac{1}{nT} \int_0^{nT} u(t)i(t)dt. \quad (3)$$

Для трифазного кола несиметричних періодичних напруги та струму можемо записати

$$P_{3\phi} = P_{3\phi\text{срп}} = \frac{A_{3\phi}(nT)}{nT} = \frac{1}{nT} \int_0^{nT} [u_A(t)i_A(t) + u_B(t)i_B(t) + u_C(t)i_C(t)]dt, \quad (4)$$

де літери «A», «B» і «C» у індексах позначень напруги та струмів вказують, що ці напруга і струми відповідають фазам A, B і C трифазного кола.

Подовжуючи логічний ланцюжок приведених вище викладок, можна визначити й середню за інтервал часу  $t_{\text{тек}}$  роботу і для випадку, коли  $u(t)$  та  $i(t)$  неперіодичні функції часу

$$P_{3\phi\text{срп}}(t_{\text{тек}}) = \frac{A_{3\phi}(t_{\text{тек}})}{t_{\text{тек}}} = \frac{1}{t_{\text{тек}}} \int_0^{t_{\text{тек}}} [u_A(t)i_A(t) + u_B(t)i_B(t) + u_C(t)i_C(t)]dt, \quad (5)$$

яка, на відміну від  $P_{3\phi}$  за формулою (4), не є константою, а змінюється в залежності від часу  $t_{\text{тек}}$ .

Для кіл несинусоїдальних періодичних струмів та напруги визначають поняття коефіцієнту потужності [3], щодо якого у прийнятих тут позначеннях справедливо

$$\chi = \frac{P}{UI} = \frac{\int_0^T u(t)i(t)dt}{\sqrt{\int_0^T u^2(t)dt} \sqrt{\int_0^T i^2(t)dt}} = \frac{P_{\text{срп}}(T)}{UI}, \quad (6)$$

де  $U$  та  $I$  – середньоквадратичні значення напруги та струму, звідки за аналогією для трифазних кіл несиметричних періодичних напруги та струмів, з урахуванням викладеного у роботі [4], маємо

$$\chi = \frac{P_{3\phi}}{\sqrt{U_A^2 + U_B^2 + U_C^2} \sqrt{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2}} = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T [u_A(t)i_A(t) + u_B(t)i_B(t) + u_C(t)i_C(t)]dt}{\sqrt{U_A^2 + U_B^2 + U_C^2} \sqrt{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2}}, \quad (7)$$

де  $U_A, U_B, U_C$  та  $I_A, I_B, I_C$  – середньоквадратичні значення відповідних фазних напруги та струмів.

Відповідно до прийнятої тут логіки узагальнень, оснований на розгляді роботи, яка виконується у колах електромагнітним полем, з подальшим її усередненням у часі, поняття  $\chi$ , яке визначено за формулою (7), можна розповсюдити й на випадок неперіодичних напруги і струмів. В цьому випадку коефіцієнт  $\chi$  вже не буде константою, як у формулі (7), а буде функцією часової змінної  $t_{\text{тек}}$ , щодо якої він визначається, тобто буде описуватися часовою залежністю  $\chi_{\text{дин}}(t_{\text{тек}})$

$$\chi_{\text{дин}}(t_{\text{тек}}) = \frac{A_{3\phi\text{срп}}(t_{\text{тек}})}{\sqrt{U_A^2 + U_B^2 + U_C^2} \sqrt{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2}} = \frac{\int_0^{t_{\text{тек}}} [u_A(t)i_A(t) + u_B(t)i_B(t) + u_C(t)i_C(t)]dt}{\sqrt{\int_0^{t_{\text{тек}}} (u_A^2(t) + u_B^2(t) + u_C^2(t))dt} \sqrt{\int_0^{t_{\text{тек}}} (i_A^2(t) + i_B^2(t) + i_C^2(t))dt}}, \quad (8)$$

а середньоквадратичні значення фазних напруги і струмів будуть визначаються формулами

$$U_{\phi}(t_{\text{тек}}) = \sqrt{\frac{1}{t_{\text{тек}}} \int_0^{t_{\text{тек}}} u_{\phi}^2(t)dt}, \quad I_{\phi}(t_{\text{тек}}) = \sqrt{\frac{1}{t_{\text{тек}}} \int_0^{t_{\text{тек}}} i_{\phi}^2(t)dt}. \quad (9)$$

**Приклад 1.** Розглянемо у трифазній мережі з  $U_{\phi} = 220$  В режим пуску АМ потужністю 110 кВт. Такий режим, коли у мережі для коригування перехідних процесів використовується напівпровідниковий одномостовий тиристорний регульований компенсатор (ТРК) за схемою з діодно-конденсаторною комутацією тиристорів, досліджено у роботі [5]. Було показано, що ТРК у пусково-

му режимі забезпечує стабілізацію напруги (запобігає її просіданню) у точці підключення навантаження, що гарантує успішний запуск АМ, а також мінімізує величину пускового струму в мережі й, тим самим, мінімізує активні втрати електричної енергії у лінії передачі. В цій роботі розроблено комп'ютерну модель системи, за допомогою якої проведено розрахунки та отримано часові діаграми пускових напруги і струмів мережі у точці підключення АМ. Відмінністю мережі, яка тут розглядається, від дослідженої у роботі [5] є те, що сумарна ємність у плечі трикутника силових конденсаторів, підключених паралельно вентильному мосту, збільшена на 400 мкФ. Цим досягається краща фільтрація силовими конденсаторами (основне призначення яких є генерування реактивної потужності задля компенсації індуктивних потужностей, що споживаються стаціонарним навантаженням мережі та АМ) вищих гармонік струму, які генеруються тиристорним мостом.

Використовуючи розроблену у роботі [5] математичну модель мережі, розраховуємо за формулою (8) у точці підключення стаціонарного навантаження та АМ значення  $\chi_{\text{дин}}$  для інтервалу пуску. Розрахунки значень  $\chi_{\text{дин}}(t)$  здійснюємо для двох режимів: 1) коли до мережі підключено ТРК (часові діаграми струму фази *A* мережі після його ударного значення наведено на рис. 1, *a*); 2) коли ТРК у мережі відсутній (часові діаграми фази *A* струму мережі – на рис. 1, *б*). На рис. 1, *в* для того ж інтервалу наведено криві залежностей  $\chi_{\text{дин з ТРК}}(t)$ ,  $\chi_{\text{дин без ТРК}}(t)$  та  $\lambda(t) = \chi_{\text{дин з ТРК}}(t) / \chi_{\text{дин без ТРК}}(t)$  – відповідно динамічних коефіцієнтів потужності для мережі з ТРК (верхня перервна лінія) та мережі, де ТРК відсутній (нижня перервна лінія), і для відношення цих коефіцієнтів (безперервна лінія).

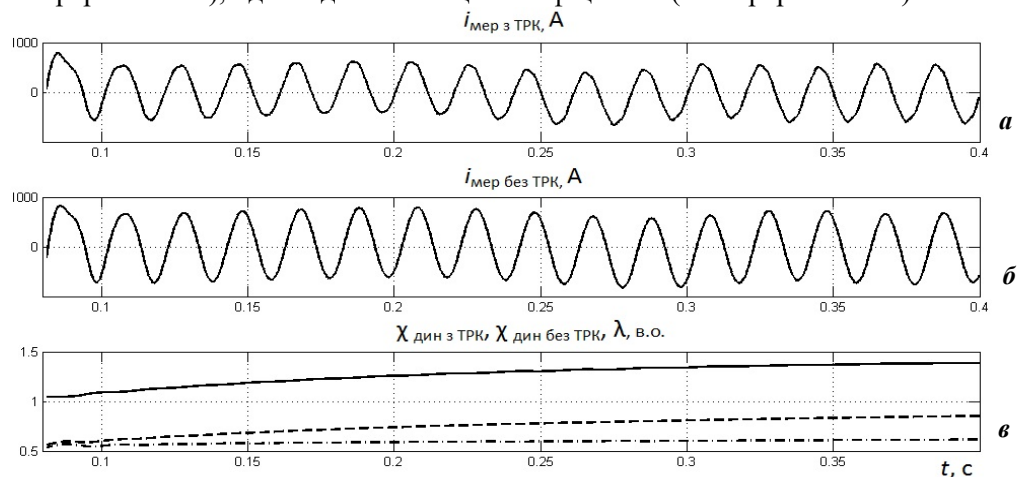


Рис. 1

**Приклад 2.** Аналогічні розрахунки проведено й у випадку, коли в мережі замість одномостового ТРК підключено двохмостовий ТРК, розглянутий у роботі [6]. Відмінністю ТРК у прикладі 2 від розглянутого в роботі [6] є те, що: 1) один вентильний міст підключено безпосередньо до мережі без використання трансформатора, а другий, як і раніше, – через фазозсувний трансформатор; 2) паралельно обом мостам підключено зібрані у трикутник силові конденсатори з сумарною ємністю у плечі 850 мкФ. На рис. 2 для цього випадку побудовано залежності, аналогічні наведеним на рис. 1.

З залежностей  $\lambda(t)$  на рис. 1 і 2 витікає, що використання двохмостового ТРК є більш ефективним.

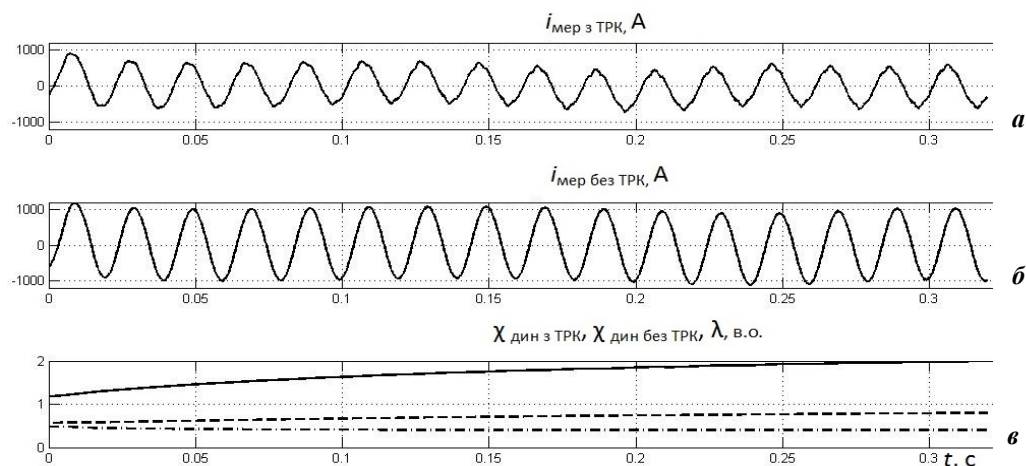


Рис. 2

**Висновки.** Введений у розгляд критерій  $\chi_{\text{дин}}$  для оцінки енергетичних аспектів перехідних процесів стосовно електричних мереж у режимі пуску асинхронних машин з успіхом може застосовуватися для порівняльної оцінки ефективності використання у мережі вентильних компенсаційних перетворювачів, які коригують пускові режими.

*Роботу виконано за рахунок коштів бюджетної програми «Напівпровідникові матеріали, технології і датчики для технічних систем діагностики, контролю та управління» (КПКВК 6541030).*

1. Дрехслер Р. Измерение и оценка качества электроэнергии при несимметричной и нелинейной нагрузке. М.: Энергоатомиздат, 1985. 112 с.
2. Артеменко М.Ю., Каплун В.В., Бобровник В.М., Поліщук С.Й. Застосування активних фільтрів для зменшення втрат енергії трифазних систем електропостачання. *Технічна електродинаміка*. 2018. № 4. С. 53-56. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.04.053>
3. Атабеков Г.И. Теоретические основы электротехники. Линейные электрические цепи. Том 1. Москва: Энергия, 1978. 592 с.
4. Schrader H.J. Zur Definition der Scheinleistung in Drehstromnetzen. *Zeitschrift fur Instrumentkunde*. 1965. Sv. 73. Es. 11. Pp. 293-298.
5. Чиженко О.І., Рибіна О.Б., Трач І.В. Напівпровідниковий регулятор для коригування режимами мережі в разі прямого запуску асинхронних двигунів зрівняної потужності. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2019. Вип. 54. С. 95-102. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2019.54.095>
6. Буткевич О.Ф., Чиженко О.І., Попович О.М., Трач І.В. Вплив FACTS на режими електричної мережі за прямого пуску потужної асинхронної машини у складі комплексного навантаження. *Технічна електродинаміка*. 2018. № 6. С. 62-68. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.06.062>

#### **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОНЯТИЯ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ УСТРОЙСТВ КОРРЕКЦИИ ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ СЕТИ**

**А.И. Чиженко**, докт.техн. наук, **А.Н. Попович**, докт.техн.наук, **И.В. Трач**, канд.техн.наук, **О.Б. Рыбина**, канд.техн.наук  
**Институт электродинамики НАН Украины,**

**пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина. E-mail: [alivchizh@ukr.net](mailto:alivchizh@ukr.net), [popovich1955@ukr.net](mailto:popovich1955@ukr.net), [igor.trach@ied.org.ua](mailto:igor.trach@ied.org.ua)**

*Обосновано распространение понятия коэффициента мощности, которое определено для цепей с периодическими напряжением и токами, на трехфазные цепи с несимметричными непериодическими напряжением и токами. Показано, что это понятие целесообразно как при рассмотрении переходных процессов, возникающих в электрических сетях в режимах пуска мощных асинхронных машин, так и при сравнительной оценке эффективности применения тех или иных технических устройств корректировки этих режимов.* Бібл. 6, рис. 2.

**Ключевые слова:** коэффициент мощности, несимметричные непериодические напряжения и токи, оценка эффективности средств коррекции режимов электрической сети

#### **USING THE CONCEPT OF POWER FACTOR FOR ESTIMATING THE DEVICES EFFICIENCY FOR CORRECTION OF NETWORKS TRANSITIONAL MODES**

**O.I. Chyzenko, O.M. Popovych, I.V. Trach, O.B. Rybina**

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

**Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine. E-mail: [alivchizh@ukr.net](mailto:alivchizh@ukr.net), [popovich1955@ukr.net](mailto:popovich1955@ukr.net), [igor.trach@ied.org.ua](mailto:igor.trach@ied.org.ua)**

*The expansion of the concept of power factor, that defined for circuits with periodic voltage and currents, to three-phase circuits with asymmetric non-periodic voltage and currents is justified. It is shown that this concept is advisable both when considering transients these occur in electric networks in the start-up modes of powerful asynchronous machines, and when evaluating the effectiveness of the use of various technical devices for these modes for correcting.* References 6, figures 2.

**Keywords:** power factor, circuits of asymmetrical non-periodic voltages and currents, estimation of efficiency of modes correction means of electric network

1. Drechsler R. Measurement and evaluation of the quality of electric power with asymmetric and non-linear load. Moskva: Energoatomizdat, 1985. 112 p. (Rus)
2. Artemenko M.Yu., Kaplun V.V., Bobrovnyk V.M., Polishchuk S.Y. Active filters application for energy losses reduction in three-phase power supply systems. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2018. No 4. Pp. 53-56. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.04.053> (Ukr)
3. Atabekov G.I. Theoretical foundations of electrical engineering. Linear electrical circuits. Vol. 1. Moskva: Enerhyia, 1978. 592 p. (Rus)
4. Schrader H.J. Zur Definition der Scheinleistung in Drehstromnetzen. *Zeitschrift fur Instrumentkunde*. 1965. Sv. 73. Es. 11. S. 293-298 (Germ)
5. Chyzenko O.I., Rybina O.B., Trach I.V. Semiconductive regulator for managing the network modes running in direct start of the asynchronous machine of the comparable capacity. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2019. No 54. Pp.95-102. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2019.54.095> (Ukr)
6. Butkevych O.F., Chyzenko O.I., Popovych O.M., Trach I.V. An influence of the FACTS upon an electrical network's mode during direct start-up asynchronous machine in the complex load's composition. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2018. No 6. Pp. 62-68. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.06.062> (Ukr)

Надійшла 04.03.2020

Остаточний варіант 06.04.2020



## MANAGEMENT OF GENERATION AND REDISTRIBUTION ELECTRIC POWER IN GRID-TIED PHOTOVOLTAIC SYSTEM OF LOCAL OBJECT

A. Shavelkin\*, I. Shvedchykova

Kyiv National University of Technologies and Design,  
str. Nemirovich-Danchenko, 2, Kyiv, 01011, Ukraine,  
e-mail: [shavolkin@gmail.com](mailto:shavolkin@gmail.com)

*Photovoltaic grid-connected system of local object with a battery when using a grid inverter with an “open” input is presented. The expediency of the structure of the converter unit use equipped by controllers of a photoelectric battery and battery with independent (external) control and the possibility of charging the battery from the grid is substantiated. It expands the possibilities of energy generation and distribution control in the power supply system of a local object with several tariff zones using an intelligent energy management system in all operating modes including autonomous. The structure of the power control channel is developed, while it is possible to use a standard MPPT controller to control the generation of a photovoltaic battery. The simulation model of the system is developed. The simulation results are given. References 9, figures 4.*

**Keywords:** photovoltaic battery, converter unit, storage battery, multi-zone tariff, power control channel, autonomous operating mode.

**Introduction.** Almost all electric power supply system of local objects (LO) with a renewable energy sources (RES) with the exception of autonomous electric power supply systems can be attributed to combined electric power systems (CEPS); they have connections to the AC distributed grid (DG) and receive power supply from it in the absence of RES generation. The use of such systems for LO is aimed at reducing electricity costs and increasing the reliability of power supply. In some cases the use of RES is predetermined by the presence of a limit on energy consumption (from the power system) or by the limited capabilities of the used DG. Improving the efficiency of CEPS through the use of intelligent systems of control of energy (ISCE), optimization of structures, and improvement of a converter unit (CU) is a promising direction of distributed generation development.

**Problem statement.** CU fulfills a key function in energy efficiency improving. It determines the generation of RES and, in the presence of a storage battery, can participate in energy redistribution in different tariff zones. The current trend is the use of multifunctional CU [1], which combines a number of functions with a power factor closed to 1 at the point of common coupling to the DG. It also provides autonomous operation mode (AOM) of LO in the absence of storage batteries (SB) [2]. Intelligent multifunctional CU are already widely marketed. There are hybrid systems [3, 4] with the photovoltaic (PV) battery, storage batteries (SB) and connection to DG. They include the use of night-time charging of the battery from the grid, followed by use during peak daytime loads, and they have a capacity of up to 10 kW, such as Growatt 10000hy [5]. The REACT 3.6 / 4.6 [6] (ABB Company) with lithium-ion batteries also provides extensive capabilities in PV generation control and load management. But it has not a charge function from the grid. These solutions are functionally completed; they have their own functioning program. At the same time, for example, it is impossible to enter the charge function from the grid or external control of the PV generation in the CU of the REACT - 3.6 / 4.6 type. This also applies to most of grid CUs for PV, which usually uses built-in MPPT controllers, which ensure PV operation in maximum power mode that excludes the possibility of external control of PV generation. This limits the possibilities of the CEPS in the AOM or with the prohibition of generation in DG. There is no possibility to connect the batteries to DG. In terms of CU using together with ISCE of LO, the “open” structure of CU is of greater interest, for example, PRO 330-TL – OUTD (ABB Company) type. At the same time, the grid voltage source inverter (VSI) has an “open” input with switching devices, current sensors and protection, which allows you to connect a PV controller and a battery charge controller with the required characteristics and external control.

Thus, the issues of generation and redistribution management of electric power in CEPS, the modification of standard CUs for the use with ICSE are insufficiently studied and need in additional research.

**The aim of the research:** the development of solutions for modifying the CU structure for PV with the generation and redistribution energy management in CEPS with ICSE with the introduction of a power control channel, which will reduce power consumption from the DG and simplify the balancing of power capacities in all modes.

**Research results.** Proposed structure of CEPS (Fig. 1) consists of load (L1, L2, ... Li), PV, SB, grid inverter (VSI). PV is connected to VSI via controller (CPV), which is regulate PV power take-off ( $P_{PV}$ ), according to signal of PV voltage reference ( $u_{PV}^*$ ) from the ISCE. Charge controller (CC) provides two-sided conductivity, with using the switch S it can be connected to the VSI input or through the rectifier (R) to the grid. In the case of a multifunctional VSI [2], which provides the active rectifier mode, the CC is connected directly to the VSI input (S and R are not needed and there are no current harmonics generated by a powerful rectifier). Management of S is carried out by the ISCE depending on the operating mode and the availability of PV generation. CC has a current regulator and an input of setting the charge / discharge current  $i_B^*$  of the SB. Load – LO consumers are connected to the grid through contacts ( $Q1 - Qi$ ) with wireless control.

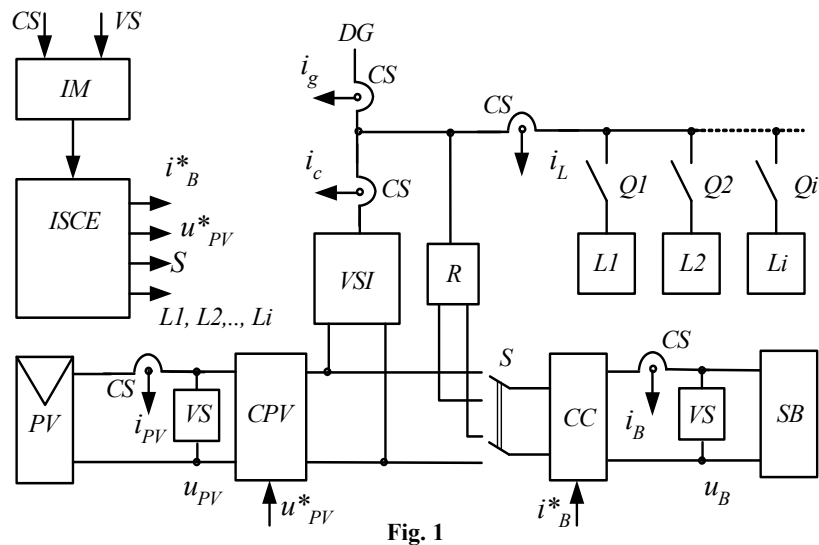


Fig. 1

Monitoring of currents and voltages in power circuits is carried out by current and voltage sensors (CS and VS on Fig. 1). The possibility of the CPV operation in the tracking mode of the maximum of the  $P_{PV}$  or the set by ICSE value  $P_{PV}^*$  is considered. A standard MPPT controller can be used if possible block it or switching-off using a relay. In this case, the regulation of energy generation to DG is carried out in relay mode: when the PV is turned off, the battery is discharged on the load; when the PV is connected, the battery is charged and receives the excess of energy. This allows you to limit (exclude) the transfer of energy in DG. This solution is connected with an increase the number of charge / discharge cycles of the SB. It is justified under implementation the autonomous mode, when there is no restriction on generation to DG in the normal mode of operation. The functions of control of the CU and the load are provided by the ISCE; information is supplied to it through the interface module (IM). IM provides the reception and transmission of signals in the system wirelessly. In addition to information from sensors, weather forecast data from the site can be entered (air temperature and cloudiness on the next day). Information for staff about the state of the system, recommendations on connecting (disconnecting) loads, warning information (including sound signals) about switching to the autonomous operation mode and about the need of transition to power saving mode with subsequent forced disconnection of secondary consumers is displayed on the screen.

The simplified structure of the channel of the power control (Fig. 2) includes: blocks of division, multiplication, adders; the unit of the SB current limitation  $i_B$  (LU) in charge and discharge mode; CC; charge degree controller (CDC); controller CPV (CCPV); unit of setting the charge current ( $I_{BC}$ ) of the SB from the DG (SCU); model SB (MSB). The following variables are used:  $P_{PV} = u_{PV} i_{PV} \eta_{CPV} \eta_{VSI}$ , where  $\eta_{CPV}$ ,  $\eta_{VSI}$  is the efficiency of CPV and VSI;  $P_L$  is the active power of load;  $P_B = u_B i_B \eta_{CC} \eta_{VSI}$ , where  $\eta_{CC}$ ,  $\eta_{VSI}$  is the efficiency of CC and VSI;  $Q = Q_0 + \int i_B dt$  is the charge degree of the SB;  $i_B^*$  is the reference of the SB current;  $Q_S$  is the start charge degree of the SB on 7 a.m.;  $D$  is the determines the daily tariffication zones, if

from 11 a.m. to 7 p.m.  $Q \geq 90\%$ , then  $D = 1$  from 7 a.m. to 11 p.m.; if from 11 a.m. to 7 p.m.  $Q < 90\%$ , then  $D = 1$  (tariff zone for morning and evening maximums) from 7 a.m. to 11 a.m. and from 7 p.m. to 11 p.m.;  $\bar{D}$  is the duration of the night and minimum days tariff;  $I_{BC}$  is the charge current of SB during the night;  $u^*_B = u_B \cdot \eta_{CC} \cdot \eta_{VSI}$ .

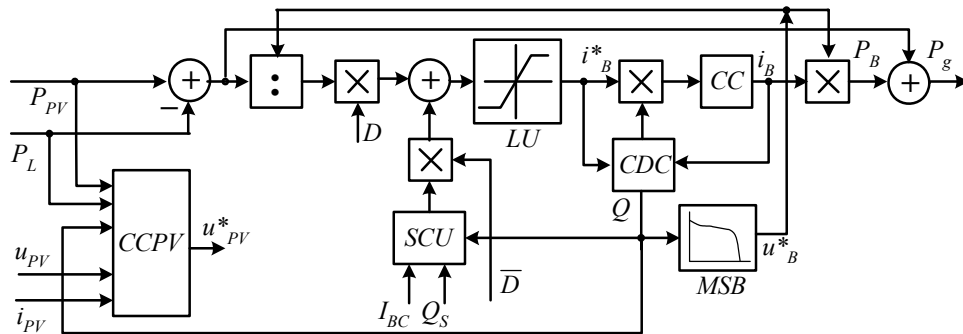


Fig. 2

**Simulation in MatLab/Simulink and experimental research.** Simulation of energy processes in CEPS was carried out in accordance with the structure in Fig. 2. The dependences of the daily load  $P_L(t)$ , solar radiation  $G(t)$  were set in tabular form. The PV model uses the equation from [8]

$$I = I_{SC} \left[ 1 - \left( 1 - I_M / I_{SC} \right)^{\frac{u - u_{OC}}{U_M - u_{OC}}} \right],$$

where  $I_{SC} = WI_{SCd}$ ,  $I_M = WI_{Md}$ ,  $U_{OC}$ ,  $U_M$  are the PV current and voltage for short circuit mode (sc), maximum power (M), open circuit mode (oc), data sheet values (d);  $W = G/1000$ .

For simplifying the temperature of the photo module is taken equal to the data sheet value and, accordingly,  $U_{OC} = U_{OCd}$ ,  $U_M = U_{Md}$ . Tracing of the maximum point  $P_{PVMAX}$  and  $P_{PV} = P^*_{PV}$  ( $P^*_{PV} = P_L + P_{gL}$  is the reference value,  $P_{gL}$  is the limit of the power which is generate in DG,  $P_{gL} = 0$  in autonomous mode) is carried out by known methods [9]. Switching to the regulation mode of PV generation is carried out at  $Q \geq 95\%$ .

The average daily value  $P_{LAV} = 5$  kW,  $P_{LMAX} = 9.125$  kW,  $W_L = 120$  kW · h. The rated PV power is selected based on the average monthly generation in June [7] under the condition  $P_{PVAV} \approx P_{LAV}$ . The battery capacity was selected from the condition  $P_B = P_{PV}$  (in [3] the ratio 4:1, in [4] – 1:2).

Oscillograms  $P_{PV}$ ,  $P_L$ ,  $P_g$  and  $Q$  for a clear June day are shown in Fig. 3: without limitation PV generation (Fig. 3, a) and at  $P_{gL} = 0$  (Fig. 3, b). On Fig. 3, c the implementation  $P_{gL} = 0$  with relay control of  $P_{PV}$  is shown. To a cloudy day (reduction  $P_{PV}$  half) corresponds to Fig. 4.

The possibility of AOM realization with relay control of  $P_{PV}$  is confirmed at an experimental set up with hybrid VSI type «AXIOMA energy» (3 kVA) with built-in MPPT controller and charge controller.

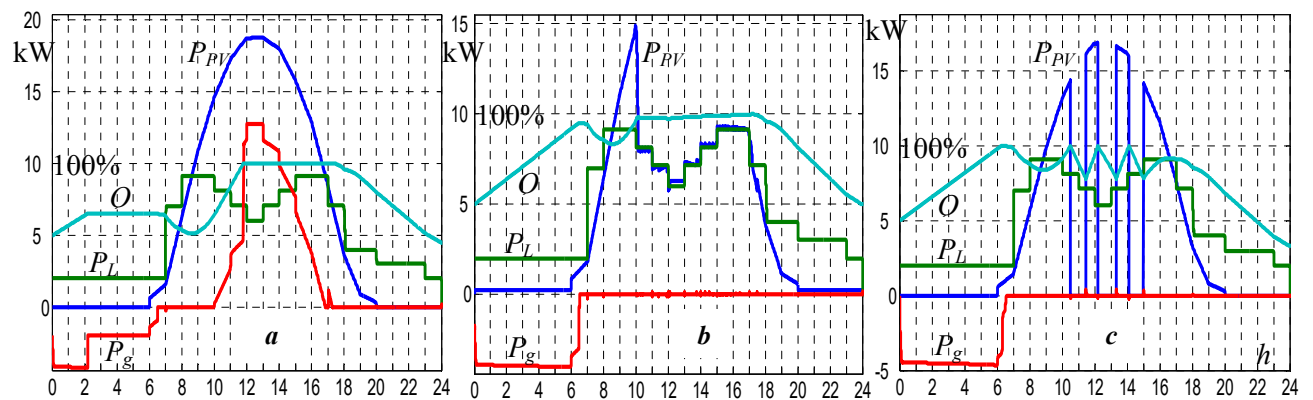


Fig. 3

**Conclusions.** The energy management and redistribution system in CEPS of LO has been improved for the CU structure with external control of the PV and SB controllers by introducing a control channel of the system's power, which carries out the battery charge / discharge control and when needed the regulation power take-off of PV. The set values of the battery current and the voltage of the PV are formed by the

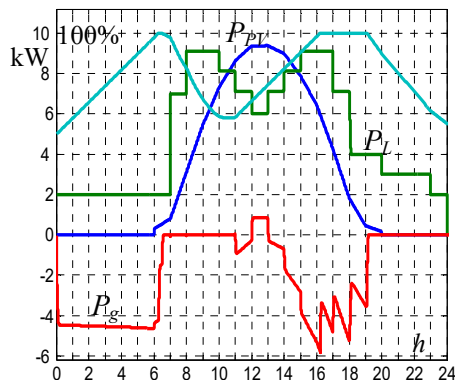


Fig. 4

ISCE. The possibility of implementation of PV generation regulation using a standard MPPT controller is shown. Battery charge from DG is carried out at the night tariff, or, if necessary, during the times of the minimum days tariff. The degree of charge can be adjusted depending on the load schedule and weather forecast for the next day, which gives an additional reduction in energy consumption. Even on cloudy days, it is possible to compensate for morning and evening load peaks. Further development of the work involves the study of issues of the direct use of the weather forecast data by ISCE. This is necessary for the formation of a recommended load schedule for the next day in normal mode and during the operation of LO in the autonomous mode with sufficient degree of charge of the battery to ensure minimum consumption until the next daylight hours.

1. Shavelkin A. Structures of single-phase converter units for combined electric power supply systems with photovoltaic solar batteries. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2018. No 2. Pp. 39-46. (Rus)  
DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.02.039>
2. Shavelkin A., Shvedchikova I. Multifunctional converter for single-phase combined power supply systems for local objects with a photovoltaic solar battery. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2018. No 5. Pp. 92-95.  
DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.05.092>
3. Set of a solar power plant "Comfortable" company "Proper power supply" (Ukr)  
URL: <https://prel.prom.ua/p33907801-sonyachnij-komplekt-elektrostantsiyi.html>. (accessed: 15.12.2019)
4. Dhiwaakar Purusothaman S.R., Rajesh R., Bajaj K.K., Vijayaraghavan V., Venkatesan M. Hybrid battery charging system using solar PV and utility grid. *Power and Energy Systems: Towards Sustainable Energy*. Bangalore. 2014. Pp. 1-5.
5. Hybrid network inverter Growatt 10000 HY. (Rus)  
URL: <https://alfa.solar.ru/gibridnyj-setevoj-invertor-growatt-hybrid-10000-hy-id494.html>. (accessed: 27.12.2019)
6. ABB solar inverters. URL: [www.abb.com/solarinverters](http://www.abb.com/solarinverters). (accessed: 05.01.2020)
7. Photovoltaic geographical information system. URL: [https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/en/tools.html#SA](https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html#SA). (accessed: 25.01.2020)
8. Shynyakov Yu., Shurygin Yu., Arbatova O. Improving the energy efficiency of autonomous photovoltaic power plants. *Elektronika, izmeritelnaya tekhnika, radiotekhnika i svyaz. Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki*. 2010. Vol. 2. No 2(22). Pp. 102-107. (Rus).
9. Malinin G., Serebryannikov A. Tracking the maximum power point of a solar batter. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*. 2016. No 3. Pp. 76-93. (Rus)

УДК 621.314.26

## УПРАВЛІННЯ ГЕНЕРАЦІЄЮ ТА ПЕРЕРОЗПОДІЛОМ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ПІДКЛЮЧЕНІЙ ДО МЕРЕЖІ ФОТОЕЛЕКТРИЧНІЙ СИСТЕМІ ЛОКАЛЬНОГО ОБ'ЄКТУ

О.О. Шавьолкін, докт.техн.наук, І.О. Шведчикова, докт.техн.наук

Київський національний університет технологій та дизайну,

вул. Немировича-Данченка, 2, Київ, 01011, Україна,

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

Розглянуто підключену до мережі фотоелектричну систему локального об'єкту з акумуляторною батареєю у разі використання мережевого інвертора з «відкритим» входом. Обґрунтовано доцільність використання структури перетворювального агрегату з комплектацією його контролерами фотоелектричної батареї та акумулятора з незалежним (зовнішнім) управлінням і можливістю заряджання акумулятора від мережі. Сто-совно до мереж з декількома тарифними зонами це розширює можливості щодо управління генерацією та роз-поділом енергії в системі електропостачання локального об'єкту під час використання інтелектуальної сис-теми управління енергоспоживанням у всіх режимах роботи, включаючи автономний. Розроблено структуру

каналу управління потужністю, за цих умов передбачено можливість використання стандартного МРРТ контролера задля управління генерацією фотоелектричної батареї. Розроблено імітаційну модель каналу управління потужністю. Наведено результати моделювання. Бібл. 9, рис. 4.

**Ключові слова:** фотоелектрична батарея, перетворювальний агрегат, акумуляторна батарея, багатозонний тариф, канал управління потужністю, автономний режим роботи.

УДК 621.314.26

## УПРАВЛЕНИЕ ГЕНЕРАЦИЕЙ И ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ПОДКЛЮЧЕННОЙ К СЕТИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ ЛОКАЛЬНОГО ОБЪЕКТА

**А.А. Шавёлкин**, докт. техн. наук, **И. А. Шведчикова**, докт. техн. наук  
Киевский национальный университет технологий и дизайна,  
ул. Немировича-Данченко, 2, Киев, 01011, Украина,  
e-mail: [shavolkin@gmail.com](mailto:shavolkin@gmail.com)

*Рассмотрена подключенная к сети фотоэлектрическая система локального объекта с аккумуляторной батареей при использовании сетевого инвертора с «открытым» входом. Обоснована целесообразность использования структуры преобразовательного агрегата с комплектацией его контролерами фотоэлектрической батареи и аккумулятора с независимым (внешним) управлением и возможностью заряда аккумулятора от сети. Применительно к сетям с несколькими тарифными зонами это расширяет возможности управления генерацией и распределением энергии в системе электроснабжения локального объекта при использовании интеллектуальной системы управления энергопотреблением во всех режимах работы, включая автономный. Разработана структура канала управления мощностью, при этом предусмотрена возможность использования стандартного МРРТ контроллера для управления генерацией фотоэлектрической батареи. Разработана имитационная модель канала управления мощностью. Приведены результаты моделирования. Библ. 9, рис. 4.*

**Ключевые слова:** фотоэлектрическая батарея, преобразовательный агрегат, аккумуляторная батарея, многозонный тариф, канал управления мощностью, автономный режим работы.

Надійшла 28.02.2020  
Остаточний варіант 24.04.2020

**КЕРУВАННЯ РЕЖИМАМИ РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖ МІСТ В УМОВАХ СЛАБКОЇ КОРЕЛЯЦІЇ ГРАФІКІВ АКТИВНОЇ ТА РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТЕЙ**

П.П. Говоров<sup>1\*</sup>, докт. техн. наук, В.О. Новський<sup>2\*\*</sup>, докт. техн. наук, В.П. Говоров<sup>1</sup>, канд. техн. наук, А.К. Кіндінова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Харківський Національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова  
вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, 61000, Україна, e-mail: [philip.govorov@gmail.com](mailto:philip.govorov@gmail.com)

<sup>2</sup> Інститут електродинаміки Національної академії наук України  
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна, e-mail: [novsky@ied.org.ua](mailto:novsky@ied.org.ua)

*Наведено результати розрахунково-експериментальних досліджень фільтрокомпенсуючого пристрою для застосування в освітлювальних електричних мережах та вольтододавального трансформатора, первинні обмотки якого підключаються до різних фаз електричної мережі, задля керування потоками активної й реактивної потужностей за слабкої кореляції графіків напруги і реактивної потужності та комплексному розв'язаному веденні режимів за напругою і реактивною потужністю в міських розподільних мережах. Бібл. 9, рис. 5.*

**Ключові слова:** вольтододавальний трансформатор, фільтрокомпенсуючий пристрій, реактивна потужність, міська електромережа, керування, режим.

**Вступ.** У сучасних умовах розвитку суспільства особливу роль набувають питання, пов'язані з економним витрачанням паливних та енергетичних ресурсів. Це вимагає, насамперед, застосування енергоефективних технологій передачі та розподілу енергії, чим забезпечується зниження її втрат в мережах та витрат у споживачів. Тому вирішення питання підвищення енергоефективності складають на сьогодні основу більшості програм як державного, так і регіонального рівнів. Зокрема важливе значення має стан енергоефективності розподільних електричних мереж міст, в яких споживається понад 40% виробленої електричної енергії та для яких найбільш важливим є висока якість ведення режимів при розподілу електроенергії. Натомість, керування режимами розподільних мереж міст, які є останньою ланкою в постачанні електричної енергії до споживачів, здійснюється сьогодні переважно в ручному дискретному режимі без врахування розподілу обладнання на значній території, а процесів – у часі. Наслідками такого стану є низька ефективність роботи мереж та підключених до них споживачів, що супроводжується високим рівнем втрат потужності в мережах і значними витратами електричної енергії при її споживанні. Втрати потужності в розподільних електричних мережах міст України доходять сьогодні до 22%, а її витрати у споживачів у 4 – 6 разів більші, ніж це має місце в розвинених країнах світу. Тому розвиток методів і технічних засобів керування режимами роботи розподільних електричних мереж міст є актуальною та важливою науково-практичною задачею.

**Метою роботи** є аналіз можливостей застосування фільтрокомпенсуючих пристроїв в освітлювальних електричних мережах, а також вольтододавальних трансформаторів, первинні обмотки яких підключаються до різних фаз електричної мережі для керування потоками активної та реактивної потужностей та їхніх складових в умовах слабкої кореляції графіків напруги і реактивної потужності та, внаслідок цього, зменшення втрат потужності в міських розподільних мережах.

**Матеріали дослідження.** Як свідчать результати досліджень, керування режимами міських електромереж за умов використання традиційних засобів комплексного вирішення питань регулювання напруги та компенсації реактивної потужності шляхом застосування косинусних конденсаторних батарей не може вирішити питання у зв'язку із забезпеченням лише їхнього пов'язаного керування [1]. Крім того, наявність у мережі електроприймачів з нелінійними характеристиками обумовлює перетікання потужності спотворень. Це вимагає задля її компенсації інших методів та технічних засобів. Дослідження спектральних характеристик електроприймачів показали високу ступінь спотворення форми кривої струму, що споживається ними з розподільної мережі та сягає 30-40%. Це робить необхідним врахування рівня спотворень у разі оцінювання режимів роботи розподільних електричних мереж з нелінійними навантаженнями. Задля розроблення технічних засобів компенсації реактивної потужності, наприклад, керування фільтрокомпенсуючих пристроїв

(ФКП) в зазначених мережах з нелінійними електроприймачами проведено розрахунок параметрів і режимів електричних мереж з урахуванням гармонічного складу кривих напруги і струму мережі. У цьому випадку опис параметрів режиму можна представити у наступному вигляді з урахуванням деяких відомих виразів, а також результатів досліджень фізичних процесів у розрядних лампах [2-4]:

$$i = \sum_{v=1}^{\infty} I_m \sin(v\omega t + \varphi_v + \varphi_{v\text{ФКП}}); \quad P = \sum_{v=1}^{\infty} U_v I_v \cos \varphi_v;$$

$$T = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2}; \quad Q = \sqrt{Q_{3\Sigma}^2 + T^2}; \quad Q_{3\Sigma} = Q_3 + Q_1; \quad \cos \varphi = P/S,$$

де  $i$ ,  $P$ ,  $Q$ ,  $\cos \varphi$  – значення параметрів режиму мережі;  $I_m$ ,  $\varphi_v$  – відповідно амплітудне значення і фазовий зсув  $v$ -ої гармоніки струму мережі;  $\varphi_{v\text{ФКП}}$  – фазовий зсув  $v$ -ої гармоніки струму фільтрокомпенсуючого пристрою;  $U_v$ ,  $I_v$  – діючі значення  $v$ -ої гармоніки напруги та струму,  $T$  – реактивна потужність спотворень;  $S$  – повна потужність;  $Q_{3\Sigma}$  – результуюча реактивна потужність зсуву;  $Q_3$  – реактивна потужність зсуву вузла навантаження;  $Q_1$  – інерційна реактивна потужність, яка характерна тільки для освітлювальних електричних мереж з розрядними лампами, що обумовлено природою газового розряду в них (тобто інерційністю носіїв заряду, яка пов'язана з «кінетичною динамічною індуктивністю» лампи).

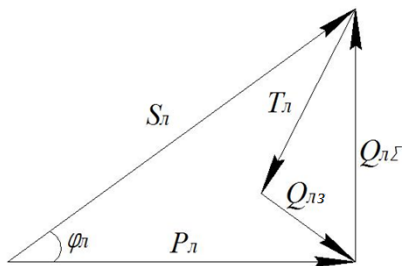


Рис. 1

На рис.1 показано векторну діаграму реактивних потужностей в міській мережі з навантаженням у вигляді розрядних ламп, яка враховує розподіл сумарної реактивної потужності освітлювальної електричної мережі на складові  $Q_{ЛЗ}$  та спотворень  $T_L$ . Для оцінки доцільності застосування ФКП запропоновано поняття коефіцієнта потужності спотворень  $K_T = T^2/Q^2$  і коефіцієнта потужності зсуву  $K_Q = Q_{3\Sigma}^2/Q^2$ , а також критерій доцільності застосування ФКП у вигляді нерівності  $K_T \geq 5\%$ .

Чисельні розрахунки параметрів режиму міських електроосвітлювальних мереж із застосуванням розрядних ламп, наприклад, типу «ДНАТ-150» потужністю  $P_L$  150 Вт дали змогу отримати наступні дані:  $I_L=2,30$  А,  $S_L=250,9$  ВА,  $P_L=203,8$  Вт,  $\cos \varphi_L=0,81$ ,  $Q_L=145,23$  ВАр,  $T_L=125,13$  ВАр,  $Q_{ЛЗ}=75,74$  ВАр,  $Q_{Л1}=46,62$  ВАр,  $K_{TЛ}=0,73$ ,  $K_{QЛ}=0,27$ .

Результати розрахунків узгоджуються з експериментальними даними, згідно з якими отримано:  $I_L=2,35$  А,  $S_L=251,45$  ВА,  $P_L=200$  Вт,  $\cos \varphi_L=0,8$ ,  $Q_L=146$  ВАр.

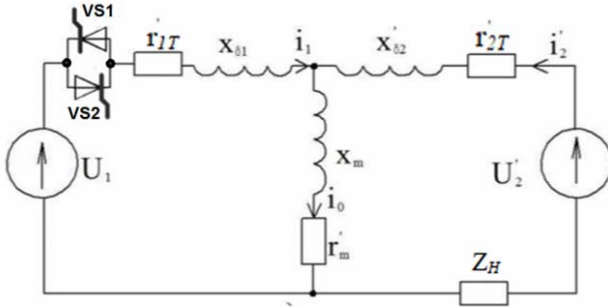
Аналіз результатів розрахунків свідчить про необхідність відокремленої компенсації реактивних потужностей спотворення  $T$  та зсуву  $Q_3$  в електричних мережах з нелінійними споживачами. Останнє вимагає застосування задля компенсації реактивної потужності в розподільних електричних мережах з нелінійним навантаженням, окрім шунтових конденсаторів, що здійснюють компенсацію лише реактивної потужності зсуву  $Q_3$ , додатково фільтрокомпенсуючих пристроїв, призначення яких – компенсація реактивної потужності спотворень  $T$ . За цих умов лише незначна величина реактивної потужності зсуву  $Q_3$  компенсується конденсаторними батареями, а більша ж її частина мусить бути скомпенсована за допомогою саме ФКП.

Дослідження і розроблення засобів керування режимами у розподільних мережах показали можливість ефективного застосування окрім ФКП також фазокерованих вольтододавальних трансформаторів (ВДТ), первинні обмотки яких підключаються до різних фаз електричної мережі, шляхом відповідного керування напівпровідниковими ключами змінного струму, циклоконверторів на основі фазорегуляторів, а також керованих фазоповоротних авто- та трансформаторів [5-9]. Визначено особливості роботи такого ВДТ в різних режимах та умови його надійної роботи у складі розподільних електричних мереж міст, зокрема, на основі проведеного аналізу схем зазначеного ВДТ і електромагнітних процесів в мережі з ним виявлено можливість насичення магнітної системи трансформатора та зсуву ЕРС і струмів в обмотках ВДТ.

Встановлено, що робота ВДТ з тиристорним перемиканням у поєднанні з найбільш поширеним часо-імпульсним способом управління та природною комутацією одноопераційних тиристорів характеризується наявністю ряду особливостей, пов'язаних із зміною величини та тривалості протікання струмів в обмотках, в залежності від режимів роботи і параметрів кіл первинної та вторинної обмоток трансформатора. Якщо тривалість протікання струму  $I_1$  в його первинній обмотці перевищує кут  $\pi$ , то за кутів керування тиристорів  $\alpha < \pi - \beta$ , де  $\beta$  – кут увімкненого стану тиристора ключа,

подання керуючої напруги, за якою він включається, відбудеться в момент часу, коли напруга на тиристорі дорівнює нулю або має зворотну полярність.

Умови надійної роботи ВДТ з тиристорами в колі первинної обмотки ВДТ можна записати у вигляді:  $\alpha > \pi - \beta + \gamma$ , де  $\gamma$  – «кут утримання» тиристора. У цьому випадку його «кут включення»  $\alpha = \pi - \beta + \gamma$  визначено, як критичний ( $\alpha_{кр}$ ). У разі зменшення кута включення тиристора до величини  $\alpha < \alpha_{кр}$  або збільшення тривалості протікання струму  $\beta$  в колі первинної обмотки до величини  $\beta > \pi + \alpha - \gamma$  трансформатор ВДТ переходить в один з аварійних режимів роботи: «дросельний» або «одностороннього підмагнічування».



Для дослідження процесів в електричних мережах з ВДТ розроблено заступну схему (рис. 2), яка враховує визначені особливості. З урахуванням викладеного, процеси в ВДТ описуються системою рівнянь

$$\begin{aligned} U_1 &= i_1 r_{1П} + L_{\sigma 1П} \frac{di_1}{dt} + L_M \frac{di_0}{dt}, \\ U_2' &= i_2' r_{2П} + L_M \frac{di_0}{dt} + L_{\sigma 2П} \frac{di_2'}{dt}, \\ i_0 &= i_1 + i_2', \end{aligned} \quad (1)$$

де  $r_{1П} = r_{1Т} + r_T$ ;  $r_{2П} = r_{2Т} + r_n$ ;  $L_{\sigma 1П}$ ,  $L_{\sigma 2П}$  – індуктивність розсіювання обмоток ВДТ;  $r_{1Т}$ ,  $r_{2Т}$ ,  $r_T$ ,  $r_n$  – активні опори обмоток трансформатора, тиристорів та навантаження;  $U_1$  – вхідна напруга;  $U_2'$  – приведена вихідна напруга;  $x_m = \omega L_m$  – індуктивний опір намагнічування;  $x_{\sigma 1} = \omega L_{\sigma 1П}$ ,  $x_{\sigma 2} = \omega L_{\sigma 2П}$ ,  $x_n = \omega L_n$  – індуктивні опори розсіювання обмоток та навантаження ВДТ (на рис. 2 також позначено:  $Z_H$  – повний опір навантаження;  $VS1$ – $VS2$  – одноопераційні тиристори).

Для оцінювання впливу режимів роботи та параметрів ВДТ на значення кута включення тиристорів  $\alpha$  в квазіусталених режимах достатнім є окреме рішення системи рівнянь (1)

$$I_1 = \frac{[\pm U_1 (R_n'^2 + x_m^2) + U_2' x_m^2 + U_2' R_n' x_m]}{(R_n' x_m^2 - x_m^2 r_{1П}' + R_n'^2 r_{1П}') + (R_n' x_m + x_{\sigma 1}' x_m^2 + R_n'^2 x_{\sigma 1}')}. \quad (2)$$

Значення критичного кута  $\alpha_{кр}$ , за яким можлива надійна робота ВДТ і мережі його живлення, визначається за умов перетворення Т-подібної заступної схеми ВДТ (рис. 2) на П-подібну та еквівалентних перетворень отриманих опорів та напруг у вигляді

$$\alpha_{кр} = \arctg \left( \frac{U_2' R_n' x_m (R_n' x_m^2 - x_m^2 r_{1П}' + R_n'^2 r_{1П}') - [\pm U_1 (R_n' r_{1П}') + U_2' x_m^2] \cdot (R_n'^2 x_m + x_{\sigma 1}' x_m^2 + R_n'^2 x_{\sigma 1}')}{[\pm U_1 (R_n' r_{1П}') + U_2' x_m^2] \cdot (R_n' x_m^2 - x_m^2 r_{1П}' + R_n'^2 r_{1П}') + U_2' R_n' x_m (R_n'^2 x_m + x_{\sigma 1}' x_m^2 + R_n'^2 x_{\sigma 1}')} \right), \quad (3)$$

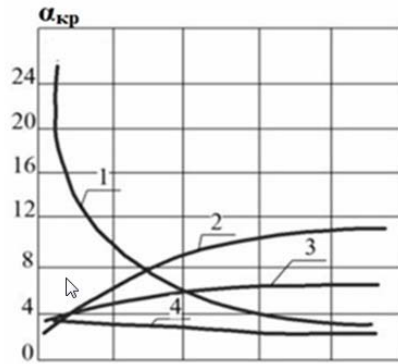
де  $R_n' = (r_{2Т}' + r_n) \cdot (W_1 / W_2)^2$ ;  $W_1$ ,  $W_2$  – число витків обмоток ВДТ; « $\pm$ » свідчить про «узгоджене» або «зустрічне» підключення обмоток ВДТ, а еквівалентні параметри елементів П-подібної заступної схеми ВДТ визначаються наступним чином:

$$U_e = \frac{U_2' \cdot x_m^2}{R_n'^2 + x_m^2}; \quad Z_e = \frac{R_n' \cdot x_m}{R_n' + x_m} = \frac{R_n' \cdot x_m^2 + R_n'^2 \cdot x_m}{R_n'^2 + x_m^2}.$$

Графічні залежності  $\alpha_{кр} = f(x_m, R_n, x_{\sigma 1}, r_{1П})$  в ел. град., що отримані в результаті розрахунку за формулою (3), показано на рис. 3 (а – «узгоджене», б – «зустрічне» включення обмоток ВДТ) для чотирьох кривих 1 – 4 при позначенні осі абсцис відповідно:  $x_m$ ;  $R_H$ ;  $x_{\sigma 1}$ ;  $r_{1П}$ .

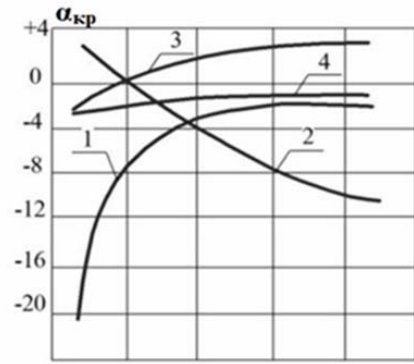
Отримані результати досліджень свідчать про те, що для забезпечення умов надійної та економічної роботи таких ВДТ в квазіусталених та перехідних режимах необхідним є керування тиристорами одночасно за струмом та напругою на тиристорах. Крім того, вони показали принципову можливість керування режимами активної та реактивної потужності за допомогою ВДТ з фазами, що перемикаються, та можливість використання ВДТ і ФКП в розподільних електричних мережах міст в як активний елемент інтелектуальних систем електропостачання, що функціонують на основі концепції *Smart Grid*.





0	100	200	300	400	$x_m, \text{OM}$
0	10	20	30	40	$R_H, \text{OM}$
0	0,1	0,2	0,3	0,4	$x_{\sigma 1}, \text{OM}$
0	1	2	3	4	$r_{II}, \text{OM}$

*a*



0	100	200	300	400	$x_m, \text{OM}$
0	10	20	30	40	$R_H, \text{OM}$
0	0,1	0,2	0,3	0,4	$x_{\sigma 1}, \text{OM}$
0	1	2	3	4	$r_{II}, \text{OM}$

*б*

Рис. 3

Задля виявлення загальних закономірностей функціонування ВДТ у складі розподільних мереж припущено, що до вузла мережі підключено групу з трьох однофазних ВДТ, а їхнє живлення по первинній обмотці здійснюється від трифазного симетричного джерела напруги.

У розглянутих умовах розподільну електричну мережу з ВДТ представлено у вигляді трифазної системи напруг і струмів різних частот та послідовностей  $p=0,1,2$  (нульова, пряма та зворотна відповідно).

З урахуванням живлення вторинної обмотки ВДТ від джерела струму у разі підключення до нього ФКП та освітлювального навантаження, вираз для визначення миттєвого значення струму, що споживається, у  $k$ -ї фазі має наступний вигляд:

$$i_{ck} = \left\{ Z_{Hkv}^{-1} \left\{ U_{mk} \sin\left[\omega t - (k-1)\frac{2\pi}{3}\right] + \sum_{v=1}^{\infty} \sum_{p=0}^2 E_{2kvm} \sin\left[v\omega t + \psi_{E2kv} - \psi_{\text{ФКП}kv} - \frac{\pi n_T}{6} - (k-1)\frac{2\pi}{3}\right] \right. \right. \quad (4)$$

$$\left. \left. \cdot \dot{S}_{kpv} \left( 1 + \frac{W_{2k}}{W_{1k}} e^{j\pi n_T/6} \right) \right\} + \sum_{v=0}^{\infty} I_{0mkv} \sin\left(v\omega t + \psi_{10kv} - \frac{\pi n_T}{6}\right) \right\} \frac{W_{2k}}{W_{1k}} e^{j\pi n_T/6},$$

де  $i_{ck}$  – споживаний струм  $k$ -ї фази первинної обмотки ВДТ;  $\psi_{E2kv}$ ,  $\psi_{\text{ФКП}kv}$ ,  $\psi_{10kv}$  – фазові зсуви  $v$ -ї гармоніки  $E_2$  (ЕРС вторинній обмотки ВДТ), ФКП і струму намагнічування  $I_0$ ;  $I_{0mkv}$  – максимальне значення струму  $I_0$ ;  $Z_{Hkv}$  – опір навантаження для  $v$ -ї гармоніки  $k$ -ї фази;  $n_T$  – група з'єднання обмоток ВДТ;  $\dot{S}_{kpv}$  – матриця одиничних ортів  $k$ -ї фази  $p$ -ї послідовності  $v$ -ї гармоніки;  $W_{1k}$  і  $W_{2k}$  – кількість витків первинної та вторинної обмоток ВДТ для  $k$ -ї фази мережі.

Для врахування техніко-економічних наслідків протікання струмів вищих гармонік в міських розподільних мережах розроблено математичну модель ефективності їхнього функціонування, яка базується на багатокритеріальній оцінці режимів мережі з урахуванням критеріїв ефективності у вигляді

$$F(\bar{Z}) = \sum_{i=1}^n f_i(\bar{Z}) \gamma_i \quad (5)$$

де  $F(\bar{Z})$  – узагальнений критерій ефективності;  $\mu_i$  – ваговий коефіцієнт ефективності по  $i$ -му критерію;  $f_i$  – критеріальна функція ефективності;  $\bar{Z} = \{Z_1, Z_2, \dots, Z_n\} \in D \subseteq R^n$  – вектор параметрів, що заданий на множині  $D$ , яка належить простору параметрів  $R^n$ .

Оптимізаційна задача « $\max F(\bar{Z})$ » за наявності обмежень на параметри вирішено методом Айере, що дозволило визначити оптимальні параметри деяких електротехнічних пристроїв, які виготовлено на підприємствах: ТОВ «ОСП Корпорація ВАТРА» (м. Тернопіль) – установча серія групових регуляторів напруги 0,38/0,22 кВ потужністю 16 – 63 кВт для освітлювального обладнання і ДП «ХЕМЗ» (м. Харків) – установча серія багатофункціональних пристроїв потужністю 63 – 160 кВт для компенсації реактивної потужності та регулювання напруги 0,38/0,22 кВ у міських електромережах. Відмінною особливістю розробленої моделі є врахування рівня вищих гармонік у складі вектору параметрів  $Z_j$  та значення втрат напруги і потужності в мережах та їхнього впливу на техніко-економічні показники роботи мереж у вигляді зміни рівня електроспоживання та комфорту споживачів електроенергії. В моделі враховано також значення відносного коефіцієнту спотворення напруги  $K^* = K_T / K_{\text{ном}}$  та відносні втрати потужності  $\Delta P^* = \Delta P / \Delta P_{\text{ном}}$ . За результатами досліджень роботи ВДТ у складі розподільних

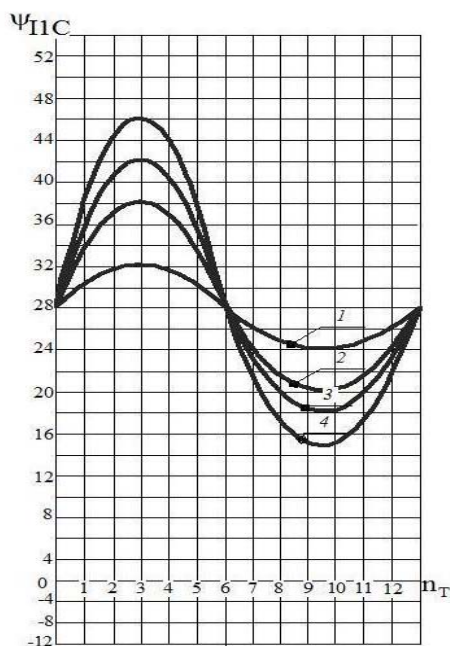


Рис.4

електричних мереж встановлено можливість забезпечення фазового зсуву струму первинної обмотці ВДТ для першої гармоніки в залежності від його параметрів (група з'єднання обмоток  $n_T$  і коефіцієнт трансформації  $K_T$ ) та мережі. Результати розрахунків свідчать про те, що зі зміною числа витків  $W_{1k}$  і  $W_{2k}$  та групи  $n_T$  змінюється модуль та фаза струму  $i_{1k}$  у первинній обмотці ВДТ і струму, який споживається з мережі, що підтверджує практичне використання зазначених ВДТ для управління потоками активної та реактивної потужностей в міських розподільних мережах, а також рекуперації частини потужності з навантажувальної мережі в живильну. На рис. 4 наведено графічні залежності  $\psi_{ik}=f(n_T)$ , отримані шляхом розрахунків за (4), де позначено: 1 – за  $K_T=10$ ; 2 – за  $K_T=5$ ; 3 – за  $K_T=4$ ; 4 – за  $K_T=3$ . Результати аналізу свідчать, що за  $n_T=1-5$  має місце відстаючий зсув струму  $i_{ck}$ , а за  $n_T=7-11$  – випереджаючий, причому за  $n_T=10-12$  і  $n_T=1-3$  відбувається збільшення модуля споживаного з мережі струму, а за  $n_T=4-5$  і  $n_T=7-8$  – його зменшення.

На рис. 5 показано графічні залежності, які відображають результати розрахунку відносної зміни втрат потужності в мережах  $\delta\Delta P$  до та після встановлення ВДТ на ділянці діючої електромережі АТ«Харківобленерго» фідеру довжиною  $L$  для різних значень коефіцієнтів потужності навантаження  $\cos\phi_n$ , трансформації  $K_T$  та групи  $n_T$  з'єднання обмоток ВДТ, а саме – на рис. 5, а: 1 –  $n_T=9$ ; 2 –  $n_T=3$ ; 3 –  $\cos\phi_n=0,86$ ; 4 –  $\cos\phi_n=0,94$ ; 5 –  $\cos\phi_n=0,98$ , а на рис. 5, б: 1 –  $n_T=7$ ; 2 –  $n_T=5$ ; 3 –  $\cos\phi_n=0,86$ ; 4 –  $\cos\phi_n=0,94$ ; 5 –  $\cos\phi_n=0,98$ .

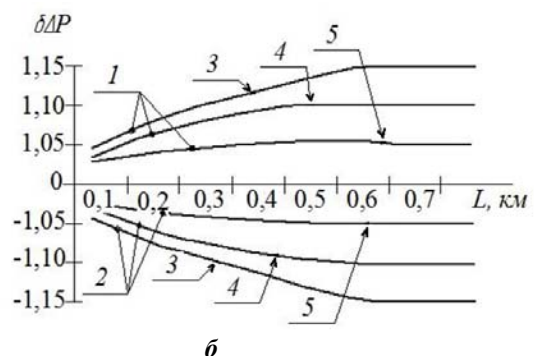
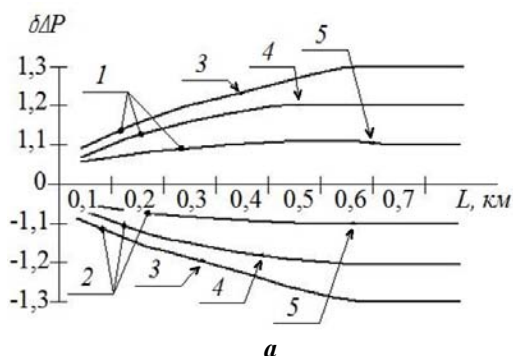


Рис. 5

Отримані результати свідчать про значне зниження втрат потужності у навантажувальному вузлі мережі, до якого підключений зазначений ВДТ.

## Висновки.

1. Показано, що для компенсації реактивної потужності в розподільних мережах з нелінійним навантаженням окрім шунтуючих конденсаторних батарей, що здійснюють компенсацію лише реактивної потужності зсуву, додатково необхідно застосування фільтрокомпенсуючих пристроїв задля компенсації реактивної потужності спотворень, зокрема, в міських освітлювальних мережах з розрядними лампами.

2. Розрахунки, виконані для різних груп з'єднання обмоток ВДТ, первинні обмотки яких підключаються до різних фаз електричної мережі, показали, що шляхом зміни числа витків і групи з'єднання їхніх обмоток можна цілеспрямовано регулювати значення модуля та фази струму в первинних обмотках ВДТ, що сприяє їхньому ефективному застосуванню як активних елементів міських інтелектуальних мереж.

3. Аналіз отриманих даних свідчить про доцільність використання зазначених ВДТ для керування потоками активної і реактивної потужностей та їхніх складових, рекуперації частини потужності з навантажувальної мережі в живильну в умовах нелінійності характеристик їхніх споживачів та низької кореляції графіків напруги і реактивної потужності та за рахунок цього добитися значного зменшення втрат потужності у розподільних мережах.

1. Говоров Ф.П., Говоров В.Ф., Терешин О.В., Четверикова И.М. Комплексное решение вопросов регулирования напряжения и компенсации реактивной мощности в осветительных электрических сетях. *Технічна електродинаміка*. 2009. Тем. вип. «Силова електроніка та енергоефективність». Ч.1. С. 47-50.

2. Крогерис А.Ф., Рашевиц К.К., Трейманис Э. П., Шинка Я.К. Мощность переменного тока. Рига: Физ.-энерг. Ин-т Латв. АН, 1993, 294 с.

3. Артеменко М.Ю., Батрак Л.М., Поліщук С.Й. Активный струм та повна потужність трифазних систем електроживлення. *Технічна електродинаміка*. 2018. № 6. С. 69-72.

DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.06.069>

4. Govorov P.P., Govorov V.P., Korol O.V. Reactive power compensation in electrical circuits with discharge lamps. *Proceeding International Scientific Conference (UNITECH-14)*. Gabrovo, 21-22 November, 2014. Vol. 1. Pp. 59-65.

5. Шидловський А.К., Новський В.О., Жаркін А.Ф. Стабілізація параметрів електричної енергії в трифазних системах напівпровідниковими коригуючими пристроями. К.: Наш формат, 2013. 378 с.

6. Липківський К.О., Можаровський А.Г. Особливості реалізації функції перетворення трансформаторно-ключової виконавчої структури регулятора-стабілізатора напруги змінного струму. *Технічна електродинаміка*. 2017. № 2. С. 35–39. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2017.02.035>

7. Tirshu M., Kalinin L., Zaitsev D., Golub I., Spivak V., The model and characteristics of circular phase convertor. 10th International Conference and Exhibition on *Electromechanical and Power Systems. Culegere de articole (SIELMEN-2015)*. 6-8 octombrie, 2015. Pp. 180-184.

8. Калинин Л., Зайцев Д., Тиршу М., Голуб И. Моделирование циклоконвертора на базе фазорегулятора с круговым преобразованием. IV міжнародна конференція *Інтелектуалькі енергетичні системи – ESS'15*. Київ, 9-12 червня, 2015. С. 317-321.

9. Kalinin L., Zaitsev D., Tirshu M., Golub I. Capabilities for improving the control strategy of direct frequency conversion by using the phase-shifting transformer with power electronic switching equipment. International conference *Energy of Moldova – 2016. Regional aspects of development*. Chisinau, Republic of Moldova, 29 September–01 October, 2016. Pp. 214-221.

## УПРАВЛЕНИЕ РЕЖИМАМИ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОСЕТЕЙ ГОРОДОВ В УСЛОВИЯХ СЛАБОЙ КОРРЕЛЯЦИИ ГРАФИКОВ АКТИВНОЙ И РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТЕЙ

**Ф.П. Говоров**<sup>1</sup>, докт. техн. наук, **В.А. Новський**<sup>2</sup>, докт. техн. наук, **В.Ф. Говоров**<sup>1</sup>, канд. техн. наук, **А.К. Киндинова**<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Харьковский Национальный университет городского хозяйства им. А.Н. Бекетова,

ул. Маршала Бажанова, 17, Харьков, 61000, Украина,

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

<sup>2</sup> Институт электродинамики НАН Украины,

пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина,

e-mail: [novsky@ied.org.ua](mailto:novsky@ied.org.ua)

*Приведены результаты расчетно-экспериментальных исследований фильтрокомпенсирующего устройства для применения в осветительных электрических сетях и вольтодобавочного трансформатора, первичные обмотки которого подключаются к различным фазам электрической сети для управления потоками активной*

и реактивной мощностей в условиях слабой корреляции графиков напряжения и реактивной мощности и комплексном решении ведения режимов по напряжению и реактивной мощности в городских распределительных сетях. Библи. 9, рис. 5.

**Ключевые слова:** вольтдобавочный трансформатор, фильтрокомпенсирующее устройство, реактивная мощность, городская электрическая сеть, управление, режим.

## MANAGEMENT OF MODES OF DISTRIBUTIVE ELECTRIC NETWORKS OF CITIES UNDER CONDITIONS OF WEAK CORRELATION OF GRAPHICS OF ACTIVE AND REACTIVE POWER

P.P. Govorov<sup>1</sup>, V.O. Novskiy<sup>2</sup>, V.P. Govorov<sup>1</sup>, A.K. Kindinova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>О.М. Бекетов Харьков National University of Urban Economy,

Marshala Bazhanova str., 17, Kharkiv, 61000, Ukraine,

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

<sup>2</sup> Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,

pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine,

e-mail: [novsky@ied.org.ua](mailto:novsky@ied.org.ua)

*Settlement and experimental studies of the use of filter-compensating devices for use in lighting electrical networks and phase-switched booster transformers for controlling the flows of active and reactive powers are presented. The analysis of component capacities in the conditions of non-linearity of the characteristics of their consumers and low correlation of voltage and reactive power in urban distribution networks is carried out. References 9, Figures 5.*

**Keywords:** phase-switched booster transformers, filter-compensating devices, reactive power, urban distribution networks, control, mode.

1. Hovorov F.P., Hovorov V.F., Teroshyn O.V., Chetverykova Y.M. A comprehensive solution to voltage regulation and reactive power compensation in lighting electrical networks. *Tekhnichna elektrodynamika*. Tematychnyi vypusk "Sylova elektronika ta energoefektyvnist". 2009. No1. Pp. 47-50. (Rus).
2. Kroherys A.F., Rashevyyts K.K., Treimanys E P., Shynka Ya.K. AC power. Ryha: Fyziko-energeticheskii institute Latviiskoi akademii nauk, 1993. 294 p. (Rus).
3. Artemenko M.Iu., Batrak L.M., Polishchuk S.I. Active current and apparent power of three-phase power systems. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2018. No 6. Pp. 69-72. (Ukr). DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.06.069>
4. Govorov P.P., Govorov V.P., Korol O.V. Reactive power compensation in electrical circuits whit discharge lamps. *Proceeding International Scientific Conference (UNITECH-14)*. Gabrovo, 21-22 November, 2014. Vol. 1. Pp. 59-65.
5. Shydlovskiy A.K., Novskiy V.O., Zharkin A.F. Stabilization of electrical parameters in three-phase systems by semiconductor corrective devices. Kyiv: Nash format, 2013. 378 p. (Ukr).
6. Lypkivskiy K.O., Mozharovskiy A.H. Features of realization of function of transformation of the transformer-key executive structure of the regulator-stabilizer of alternating current. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2017. No 2. Pp. 35-39. (Ukr). DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2017.02.035>
7. Tirshu M., Kalinin L., Zaitsev D., Golub I., Spivak V., The model and characteristics of circular phase convertor. 10th International Conference and Exhibition on *Electromechanical and Power Systems*. *Culegere de articole (SIELMEN-2015)*. 6-8 octombrie. 2015. Pp.180-184.
8. Kalinin L., Zaitsev D., Tirshu M., Golub I. Modeling a cyclo-convertor based on a phase shifter with circular conversion. IV International Conference *Intelligent Energy Systems ESS'15*. Kyiv, 9-12 June, 2015. Pp. 317-321. (Rus).
9. Kalinin L., Zaitsev D., Tirshu M., Golub I. Capabilities for improving the control strategy of direct frequency conversion by using the phase-shifting transformer with power electronic switching equipment. International conference *Energy of Moldova – 2016. Regional aspects of development*. Chisinau, Republic of Moldova, 29 September – 01 October, 2016. Pp.214-221.

Надійшла 28.02.2020

Остаточний варіант 08.04.2020

**ЗНИЖЕННЯ ДОДАТКОВИХ ВТРАТ В ОБМОТКАХ СИЛОВИХ РЕАКТОРІВ**

А.Н. Hoevenaars<sup>1\*</sup>, А.В. Lavreniuk<sup>1\*\*</sup>, І.В. Пентегов<sup>2\*\*\*</sup>, докт.техн.наук, С.В. Римар<sup>2\*\*\*\*</sup>, докт.техн. наук, В.М. Сидорець<sup>2\*\*\*\*\*</sup>, докт.техн.наук

<sup>1</sup>MIRUS International Inc.,  
31 Sun Pac Blvd., Brampton, Canada L6S 5P6.

E-mail: [mirus@mirusinternational.com](mailto:mirus@mirusinternational.com)

<sup>2</sup>Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України,  
вул. К. Малевича, 11, Київ, 03680, Україна.

E-mail: [sydorvn@gmail.com](mailto:sydorvn@gmail.com)

*Запропоновано підхід до зниження додаткових втрат від вихрових і циркулюючих струмів в обмотках силових реакторів із множинними немагнітними проміжками в стрижнях магнітопроводів. Підхід базується на варіації величин немагнітних проміжків та їхнього розташування по довжині стрижня – зменшення величин проміжків відбувається від центру стрижня до його країв, а зменшення відстані між проміжками – від країв до центру стрижня. У результаті магнітні потоки розсіювання між стрижнями магнітопроводу зменшуються та відповідно зменшуються додаткові втрати в обмотках та їхній нагрів. Завдяки цьому знижуються витрати активних матеріалів і вартість реакторів та збільшується ККД, що підвищує їхню конкурентоспроможність на ринку електротехнічного устаткування. Переваги запропонованого підходу особливо ефективні в реакторах за наявності вищих гармонік струму, зокрема, в реакторах пасивних фільтрів. Библ. 9, рис. 1.*

**Ключові слова:** електричні апарати, реактори, магнітопроводи, магнітні потоки розсіювання, немагнітні проміжки, додаткові втрати, енергозбереження.

**Вступ.** Обумовлений зростаючою конкуренцією на світовому ринку електротехнічного устаткування, іде постійний процес покращення його технічних характеристик за умов зменшення собівартості виготовлення та експлуатаційних витрат, а мінімізація витрат у процесі виготовлення за рахунок підвищення його ефективності завжди було і залишається актуальною науково-технічною задачею. Навіть невелике зниження вартості устаткування призводить до збільшення його конкурентоспроможності. Одним з вирішальних чинників є зменшення маси активних матеріалів за збереженням або покращенням технічних і експлуатаційних характеристик та підвищенням ККД.

**Метою** роботи є викладення запропонованого авторами підходу зниження додаткових втрат в обмотках силових реакторів із множинними немагнітними проміжками в стрижнях магнітопроводів, що дає змогу знизити витрати активних матеріалів і вартість силових реакторів, а відповідно підвищити їхню конкурентоспроможність на ринку електротехнічного устаткування. Це є **актуальною задачею** у ході розробки, розрахунку, проектуванні, виробництві та впровадженні нової технічної продукції.

**Методологія** дослідження ґрунтувалася на вивченні зміни параметрів силових реакторів за несиметричним розподілом в стрижнях магнітопроводів немагнітних проміжків у процесі практичного доведення на виробництві їхніх індуктивностей до заданого рівня. Аналіз дослідних даних дав змогу виявити істотний вплив такої асиметрії на втрати в обмотках та їхній нагрів. Саме ці знання наштовхнули на ідею **вперше** в практиці побудови трифазних реакторів зменшити ці втрати оригінальним нерівномірним розподілом немагнітних проміжків та їхніх величин в стрижнях магнітопроводів, але симетрично від центрів стрижнів. Було проведено теоретичні дослідження, що ґрунтувалися на теорії розповсюдження електромагнітних полів в трансформаторах і реакторах, втратах в обмотках від вихрових і циркулюючих струмів [1, 2]. Розрахунки і експерименти на виробництві засвідчили правильність ідеї. Це дало **позитивні результати**, використання яких **на практиці** дало змогу виготовити силові реактори із зменшеними додатковими втратами, збільшеним ККД, зменшеною масою обмоток та, відповідно, зниженою собівартістю виробів. Експериментальна апробація проводилася на науково-виробничій базі компанії MIRUS International Inc., а нові запропоновані підходи знайшли

© Hoevenaars A.H., Lavreniuk A.V., Пентегов І.В., Римар С.В., Сидорець В.М., 2020  
ORCID ID: \*<https://orcid.org/0000-0003-0643-5219>; \*\*<https://orcid.org/0000-0002-5632-6873>;  
\*\*\*<https://orcid.org/0000-0002-0223-4594>; \*\*\*\*<https://orcid.org/0000-0003-0490-4608>;  
\*\*\*\*\*<https://orcid.org/0000-0002-8498-4726>

застосування у процесі проектування та виробництва енергозберігаючого устаткування [3–5], що конкурує на світовому ринку електротехнічної продукції.

Даний матеріал публікується авторами вперше.

**Результати досліджень.** Зазвичай, на першому етапі тестування дослідних зразків силових реакторів з рівномірно розподіленими вздовж стрижнів магнітопроводів однаковими немагнітними проміжками вимірюється їхня індуктивність. В трифазному виконанні в компанії MIRUS International Inc. – це реактори з прохідною потужністю від 100 до 3500 кВт. Якщо виміряні та розрахункові величини індуктивностей не співпадають, здійснюється корегування величин немагнітних проміжків під верхніми ярами. Після збігу фактичних і розрахункових величин індуктивностей, на другому етапі, отримані скореговані сумарні немагнітні проміжки знову рівномірно розподіляються по всім немагнітним проміжкам вздовж стрижнів. Дані прототипи реакторів слугують контрольними зразками для всіх серій подібних реакторів.

У процесі більш ґрунтовного дослідження першого етапу проміжного тестування реакторів, коли в них були змінені розміри верхніх немагнітних проміжків, було виявлено, що в цих реакторах *суттєво* змінюється температура нагріву обмоток. У реакторах, в яких обмотки було виконано із фольги, за збільшеного верхнього немагнітного проміжку температури зростали, а за зменшеного – спадали. Це природно і пояснюється тим, що у першому випадку зростає величина магнітних потоків розсіювання між стрижнями магнітопроводу та, відповідно, збільшуються додаткові втрати в провідниках обмоток від вихрових струмів [1, 2, 6, 7], а в другому – вони зменшуються. У разі використання в обмотках паралельних провідників прямокутного поперечного перетину, розташованих в аксіальному напрямку, температура їхнього нагріву зростала як за збільшених, так і зменшених верхніх немагнітних проміжках, але в першому випадку більш суттєво. Це пов'язано із збільшенням додаткових втрат в паралельних провідниках обмоток від циркулюючих в них струмів (зрівняльних струмів) [1, 2] у зв'язку з виникненням асиметрії розповсюдження полів розсіювання між стрижнями магнітопроводів відносно їхніх центрів. Але вже після другого етапу, коли немагнітні проміжки пропорційно і рівномірно розподіляються вздовж стрижнів магнітопроводів, потоки розсіювання стають симетричними відносно центрів, додаткові втрати від вихрових струмів зменшуються, а втрати від циркулюючих струмів ставали мінімальними або зовсім зникали. Втрати в обмотках та їхні температури поверталися до номінальних значень.

Наприклад, в силовому трифазному реакторі фільтра вищих гармонік струму з обмотками із фольги, з прохідною потужністю 350 кВт, лінійною напругою 480 В, частотою струму 60 Гц, індуктивністю 0,244 мГн, немагнітними проміжками в одному стрижні  $4 \times 1,5 \text{ мм} = 6,0 \text{ мм}$  за струму в обмотці 292,3 А і напрузі на ній 26,9 В активні втрати становили **452 Вт**. За розподілом в тому ж реакторі проміжків  $1 \times 3,9 \text{ мм} + 3 \times 0,8 \text{ мм} = 6,3 \text{ мм}$ , тобто збільшеному у 2,6 рази верхньому немагнітному проміжку і зменшеними у 2 рази іншими проміжками, активні втрати за струму в обмотці 283,9 А і напрузі на ній 26,9 В становили **667 Вт**. Таким чином, втрати за збільшеного верхнього немагнітного проміжка зросли на **215 Вт**, що становить **48%**. Оскільки обмотки в реакторі виконані із фольги, в них немає ще втрат від циркулюючих струмів. Подібні тенденції спостерігалися у всіх досліджених реакторах.

Видно, що розподіл немагнітного проміжку дуже суттєво впливає на величину додаткових втрат в обмотках реактора, а відповідно і на їхній нагрів.

Збільшення немагнітних зазорів біля ярем збільшує додаткові втрати в обмотках від вихрових струмів, а їхнє зменшення – знижує, асиметрія розподілу немагнітних проміжків відносно центрів стрижнів збільшує втрати від циркулюючих струмів за паралельними провідниками обмоток, розташованими в аксіальному напрямку.

В зв'язку з цим було поставлено задачу – за рахунок варіації величин немагнітних проміжків вздовж стрижнів домогтися зменшення додаткових втрат в обмотках трифазних реакторів в порівнянні з рівномірно розподіленими проміжками без зміни конфігурації обмоток. Було проведено всебічний аналіз такої можливості та запропоновано два варіанти вирішення цієї задачі, які можна поєднувати один з одним. Розглянемо ці варіанти і шляхи їхнього втілення.

**Варіант I.** Проаналізуємо епюри розподілу поперечних складових магнітних індукцій у вікнах різних типів магнітопроводів реакторів.

У відсотковому відношенні найбільші поперечні магнітні потоки розсіювання, від яких додаткові втрати найбільші, спостерігаються у вікнах реакторів з Ш-подібними магнітопроводами, у яких немагнітні проміжки розташовані біля одного яра. На рис. 1, а показано епюру поперечних складових

вих магнітних індукцій у вікні такого реактора, де позначено: 1 – обмотки на стрижні однієї фази; 2 – стрижні магнітопроводів; 3 – ярма; 4 – епюри магнітних індукцій потоків розсіювання у вікнах магнітопроводів при плоско-паралельному поперечному полі без врахування скін-ефекту в провідниках обмоток (тобто тонких провідниках);  $\delta$  – сумарний немагнітний проміжок;  $n$  – кількість немагнітних проміжків;  $B_s$  – максимальна поперечна складова амплітуди магнітної індукції на краях обмотки біля проміжку в Ш-подібному магнітопроводі. Розподіл магнітних потоків тут аналогічний його розподілу в пазах електричних машин [8]. На рис. 1 скін-ефект [1, 2] в провідниках обмоток не врахований, оскільки показано лише тенденції зміни рівня магнітних індукцій у вікнах магнітопроводів. Поблизу ярем епюри також умовні.

На рис. 1, а ( $n = 1$ ) магнітна індукція у вікні магнітопроводу біля стрижня і ярма без проміжку дорівнює нулю, а біля проміжку –  $B_s$ .

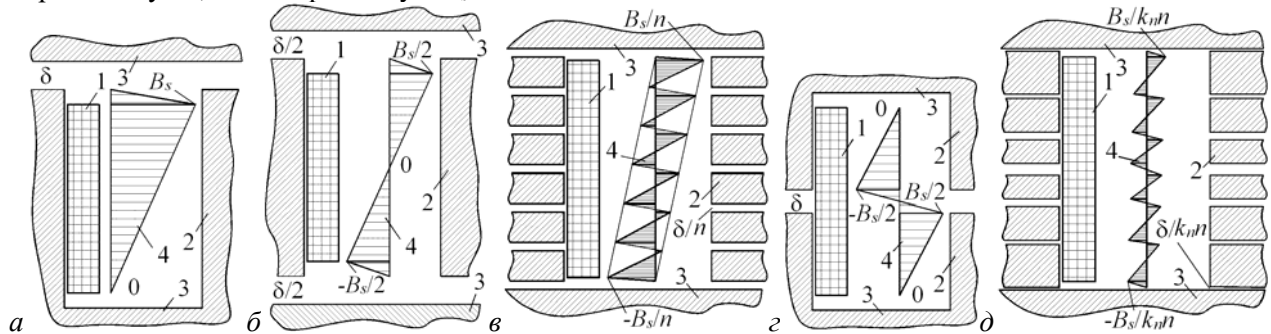


Рис. 1

В стрижневих магнітопроводах з двома немагнітними проміжками ( $n = 2$ ), розташованими по краях стрижнів (рис. 1, б), індукція біля ярем у вікні магнітопроводу, у порівнянні з рис. 1, а, знижується вдвічі  $B_s/2$ , нульове значення індукції знаходиться по центру стрижнів, а площа епюр, яка пропорційна втратам, зменшується приблизно у 4 рази.

В стрижневих магнітопроводах з сімома немагнітними проміжками (рис. 1, в) рівень магнітних індукцій у вікні магнітопроводу у ярем, у порівнянні з рис. 1, а, знижується приблизно у 7 разів –  $B_s/7$ . Тобто збільшення кількості однакових немагнітних проміжків в  $n$ -разів знижує рівень магнітних індукцій у вікні магнітопроводу в зоні ярем приблизно  $n$  разів –  $B_s/n$ , а втрати від них – в  $n^2$  разів. У цьому випадку суттєво зменшуються додаткові втрати в обмотках реакторів.

Важливо відмітити, що зменшення магнітної індукції, як і для магнітопроводу з двома проміжками, можна досягти в реакторах з двома Ш-подібними магнітопроводами, у яких один немагнітний проміжок розташований по центру стрижнів (рис. 1, г). З розгляду картини розподілу магнітного поля можна побачити, що за величини проміжку  $\delta$ , такому ж як і для рис. 1, а, рівень індукції біля немагнітних проміжків у вікні магнітопроводу, у порівнянні з рис. 1, а, знижується вдвічі  $B_s/2$ , як для рис. 1, б, а нульове значення індукції спостерігається біля ярем. Тобто розташування одного великого немагнітного проміжку у центрі стрижнів вдвічі знижує магнітну індукцію потоків розсіювання у вікні магнітопроводу в порівнянні з одним таким же проміжком, розташованим біля ярма.

Цю важливу властивість щодо зменшення додаткових втрат в силових реакторах з множинними немагнітними проміжками було вперше використано авторами і компанією MIRUS International Inc. при встановленні закономірності розподілу немагнітних проміжків по довжині стрижнів магнітопроводу та варіації їхніх величин. Це можна сформулювати так: *найбільші величини немагнітних проміжків розташовуються ближче до центру стрижнів і поступово зменшуються до їхніх країв в сторону ярем*. Це є перший варіант підходу.

Даний варіант підходу до зниження додаткових втрат було досліджено і експериментально випробувано на науково-виробничій базі компанії на ряді силових реакторів. Було одержано позитивний результат.

Наприклад, у силовому трифазному реакторі з обмотками, виконаними із паралельних провідників прямокутного поперечного перетину, розташованих в аксіальному напрямку, з прохідною потужністю 175 кВт, лінійною напругою 480 В, частотою струму 60 Гц, індуктивністю 0,917 мГн, проміжками в одному стрижні  $3 \times 1,968 \text{ мм} = 5,904 \text{ мм}$ , за струмом в обмотці 88,3 А і напругою на ній 30,5 В активні втрати становили **98 Вт**. У разі розподілу в тому ж реакторі проміжків  $1 \times 3,175 \text{ мм} + 2 \times 1,175 \text{ мм} = 5,525 \text{ мм}$ , активні втрати за струмом в обмотці 87,0 А і напругою на ній 31,6 В становили

**91 Вт.** Таким чином, втрати за зменшених крайніх і збільшеному центральному проміжку зменшилися на **7 Вт**, що становить **7%**.

**Варіант II.** Цей ефект можна посилити, якщо варіювати відстань між проміжками секцій, а саме, зменшувати відстань між проміжками від країв до центру стрижнів. Це формулюється так: *на краях стрижня необхідно встановлювати найдовші його секції і зменшувати довжину секцій до центру стрижня, тим самим зміщуючи проміжки ближче до центру стрижня.* Це є другим варіантом зменшення додаткових втрат, який також було вперше використано авторами і компанією MIRUS International Inc. для зниження додаткових втрат в обмотках трифазних силових реакторів.

Зазначимо, що досліди з варіювання відстані між немагнітними проміжками секцій стрижнів двохстрижневих магнітопроводів однофазних реакторів, але за дослідженням зміни їхньої загальної індуктивності, описано у роботі [9]. В ній показано, що індуктивність однофазних реакторів збільшується за умови концентрації проміжків в стрижнях біля ярем і зменшується – ближче до центрів стрижнів.

Ці дослідження також підтверджують, що таким же чином збільшуються і зменшуються потоки розсіювання між стрижнями, які і викликають зміну загальної індуктивності реакторів, а відповідно і зміну додаткових втрат в їхніх обмотках.

Обидва варіанти підходу до зниження додаткових втрат в силових реакторах з множинними немагнітними проміжками можна застосовувати одночасно (рис. 1, *д*). Видно, що рівень індукцій, у порівнянні з рис. 1, *в*, тут зменшений. На рисунку  $k_n$  – коефіцієнт при  $n$ -му проміжку.

За даними компанії MIRUS International Inc. у досліджених реакторах різних типів з обмотками із провідників прямокутного поперечного перетину зниження втрат коливалося у діапазоні 5...40%, а з обмотками із фольги – 4...10%. Це особливо ефективно в реакторах за наявності вищих гармонік струму.

Значення величин проміжків і довжин секцій стрижня, коли з врахуванням скін-ефекту максимальні значення індукцій на еполах наближали до менших значень і одна до одної, можна одержати, розв'язуючи «гладку» варіаційну задачу, тобто варіаційну задачу з неперервними аргументами. Але дотримання цих розмірів на практиці забезпечити не просто, оскільки у виробництві використовуються стандартні товщини ізоляційних матеріалів, з яких набираються немагнітні проміжки. Розмір секцій стрижнів магнітопроводу також може змінюватися лише дискретно. Лімітується максимальний та мінімальний розмір секцій. Така «дискретна» варіаційна задача з обмеженнями складніша за «гладку», але і вона дає прийнятний для практики результат зменшення додаткових втрат. Розроблення методики та алгоритму розв'язку такої варіаційної задачі потребує подальшої роботи.

**Висновки.** Вперше встановлено, що в силових реакторах з множинними немагнітними проміжками зменшення величин немагнітних проміжків між секціями стрижнів магнітопроводів від центру стрижнів до їхніх країв і зменшення відстані між ними від країв до центру стрижнів призводить до зменшення додаткових втрат в обмотках та їхнього нагріву завдяки зменшенню магнітних потоків розсіювання між стрижнями магнітопроводу. Застосування такого підходу дає змогу знизити витрати активних матеріалів і вартість реакторів та підвищити ККД. Це призводить до підвищення конкурентоспроможності реакторів на ринку електротехнічного устаткування. Практичний досвід компанії MIRUS International Inc. засвідчив, що переваги запропонованого підходу особливо ефективні в реакторах за наявності вищих гармонік струму, зокрема в реакторах пасивних фільтрів.

1. Лейтес Л.В. Электромагнитные расчеты трансформаторов и реакторов. Москва: Энергия, 1981. 392 с.

2. Сергеевков Б.Н., Киселев В.М., Акимова Н.А. Электрические машины: Трансформаторы. Москва: Высшая школа, 1989. 352 с.

3. Farbis M., Hoveenaars A.H., McGraw M. Marine Duty Harmonic Mitigation on DC Propulsion Saves Oil Service Vessel Program. *IEEE Transactions on Industry Applications*. March-April, 2017. Vol. 53. Issue 2. Pp. 1617-1626. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIA.2016.2621102>

4. Hoveenaars A.H., McGraw M., Alexander J. Right-Sizing Generators through Harmonic Mitigation Realizes Energy, Emissions, and Infrastructure Reductions. *IEEE Transactions on Industry Applications*. Jan.-Feb., 2017. Vol. 53. Issue 1. Pp. 675-683. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIA.2016.2603143>

5. Farbis M., Hoveenaars A.H., Greenwald J.L. Oil Field Retrofit of ESPs to Meet Harmonic Compliance. *IEEE Transactions on Industry Applications*. Jan.-Feb., 2016. Vol. 52. Issue 1. Pp. 718-728. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIA.2015.2481358>

6. Ламмеранер Й., Штафль М. Вихревые токи. Москва-Ленинград: Энергия, 1967. 208 с.

7. Туровский Я. Техническая электродинамика. Москва: Энергия, 1974. 488 с.

8. Вольдек А.И. Электрические машины. Ленинград: Энергия, 1974. 840 с.

9. Abe T., Hamakake H., Kikuchi K. Reactor Core and Reactor. Patent US № 20100171580 A1. 2010.



## СНИЖЕНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ПОТЕРЬ В ОБМОТКАХ СИЛОВЫХ РЕАКТОРОВ

А.Н. Hoevenaars<sup>1</sup>, А.В. Lavreniuk<sup>1</sup>, И.В. Пентегов<sup>2</sup>, С.В. Рымар<sup>2</sup>, В.Н. Сидорец<sup>2</sup>

<sup>1</sup>MIRUS International Inc.,

31 Sun Pac Blvd., Brampton, Canada L6S 5P6, e-mail: [mirus@mirusinternational.com](mailto:mirus@mirusinternational.com)

<sup>2</sup>Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины,

ул. К. Малевича, 11, Киев, 03680, Украина, e-mail: [sydorvn@gmail.com](mailto:sydorvn@gmail.com)

*Предложен подход снижения дополнительных потерь от вихревых и циркулирующих токов в обмотках силовых реакторов с множественными немагнитными зазорами в стержнях магнитопроводов. Подход базируется на вариации величин немагнитных зазоров и их распределении по длине стержня – уменьшение величин зазоров происходит от центра стержня к его краям, а уменьшение расстояния между зазорами имеет место от краев к центру стержня. В результате магнитные потоки рассеяния между стержнями магнитопровода уменьшаются, и, соответственно, уменьшаются дополнительные потери в обмотках и их нагрев. Благодаря этому снижаются расходы активных материалов и стоимость реакторов и увеличивается КПД, что повышает их конкурентоспособность на рынке электротехнического оборудования. Преимущества предлагаемого подхода особенно эффективны в реакторах при наличии высших гармоник тока, в частности, в реакторах пассивных фильтров. Библи. 9, рис. 1.*

**Ключевые слова:** электрические аппараты, реакторы, магнитопроводы, магнитные потоки рассеяния, немагнитные зазоры, дополнительные потери, энергосбережение.

## REDUCING ADDITIONAL LOSSES IN POWER REACTOR WINDINGS

А.Н. Hoevenaars<sup>1</sup>, А.В. Lavreniuk<sup>1</sup>, I.V. Pentegov<sup>2</sup>, S.V. Rymar<sup>2</sup>, V.M. Sydorets<sup>2</sup>

<sup>1</sup>MIRUS International Inc.,

31 Sun Pac Blvd., Brampton, Canada L6S 5P6, e-mail: [mirus@mirusinternational.com](mailto:mirus@mirusinternational.com)

<sup>2</sup>Paton Welding Institute National Academy of Sciences of Ukraine,

11, K. Malevicha str., Kyiv, 03680, Ukraine, e-mail: [sydorvn@gmail.com](mailto:sydorvn@gmail.com)

*An approach to reduce the additional losses from eddy and circulating currents in the windings of power reactors with non-magnetic multi-gaps in the legs of the magnetic cores is proposed. The approach is based on variations of the values of non-magnetic gaps and their distribution along the leg – decrease of the gaps occurs from the center of the leg to its edges, and decrease of the distance between the gaps takes place from the edges to the center of the leg. As a result, the magnetic leakage fluxes between the legs of the magnetic core are reduced, and additional losses in the windings and their heating are reduced, accordingly. Due to this, expenses on the active materials and the cost of reactors are reduced and efficiency is increased, which increases their competitiveness in the market of electrical equipment. The advantages of the proposed approach are especially effective for reactors while the higher current harmonics present, in particular, for passive filter reactors. References 9, figure 1.*

**Key words:** electrical apparatus, reactors, magnetic circuits, magnetic fluxes of scattering, non-magnetic gaps, additional losses, energy conservation.

1. Leites L.V. Electromagnetic calculations of transformers and reactors. Moskva: Energiya, 1981. 392 p. (Rus)
2. Sergeenkov B.N., Kiselev V.M., Akimova N.A. Electric machinery: Transformers. Moskva: Vysshay Shkola, 1989. 352 p. (Rus)
3. Farbis M., Hoevenaars A.H., McGraw M. Marine Duty Harmonic Mitigation on DC Propulsion Saves Oil Service Vessel Program. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2017. Vol. 53. Issue 2. Pp. 1617-1626. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIA.2016.2621102>
4. Hoevenaars A.H., McGraw M., Alexander J. Right-Sizing Generators through Harmonic Mitigation Realizes Energy, Emissions, and Infrastructure Reductions. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2017. Vol. 53. Issue 1. Pp. 675- 683. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIA.2016.2603143>
5. Farbis M., Hoevenaars A.H., Greenwald J.L. Oil Field Retrofit of ESPs to Meet Harmonic Compliance. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2016. Vol. 52. Issue 1. Pp. 718-728. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIA.2015.2481358>
6. Lammeraner J., Stafel M. Eddy currents. Moskva-Leningrad: Energiya, 1967. 208 p. (Rus)
7. Turowski J. Technical electrodynamics. Moskva: Energiya, 1974. 488 p. (Rus)
8. Voldek A.I. Electrical machines. Leningrad: Energiya, 1974. 840 p. (Rus)
9. Abe T., Hamakake H., Kikuchi K. Reactor Core and Reactor. Patent US № 20100171580 A1. 2010.

Надійшла 04.03.2020  
Остаточний варіант 01.04.2020

**СКЛАДОВІ МОДЕЛІ ДЛЯ АНАЛІЗУ ВПЛИВУ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ НА РИНКОВУ ВАРТІСТЬ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В УКРАЇНІ**Г.А. Іванов<sup>1</sup>, І.В. Блінов<sup>2\*</sup>, докт. техн. наук, Є.В. Парус<sup>2\*\*</sup>, канд. техн. наук, В.О. Мірошник<sup>2\*\*\*</sup><sup>1</sup> ДП «Гарантований покупець»,

вул. С. Петлюри, 56, Київ, 03680, Україна,

e-mail: [gennadiy\\_i@icloud.com](mailto:gennadiy_i@icloud.com)<sup>2</sup> Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна.

E-mail: [blinovigor81@gmail.com](mailto:blinovigor81@gmail.com);[paruseugene@gmail.com](mailto:paruseugene@gmail.com);[miroshnyk.volodymyr@gmail.com](mailto:miroshnyk.volodymyr@gmail.com)

*Розглянуто організаційні засади та функції балансуєчої групи Гарантованого покупця як основного механізму реалізації державної програми підтримки розвитку виробників з відновлюваними джерелами енергії. Проаналізовано основні переваги та недоліки таких об'єктів в частині їхнього впливу на процеси ціноутворення в організованих сегментах ринку електроенергії України. Визначено загальні підходи вирішення проблем, що виникають в умовах підвищення частки виробництва електроенергії з відновлюваних джерел в Україні. Запропоновано підходи до побудови засобів аналізу факторів впливу обсягів відпущеної станціями з відновлюваними джерелами виробництва електроенергії на процеси ціноутворення в організованих сегментах ринку електроенергії України. Бібл. 4, рис. 1.*

**Ключові слова:** гарантований покупець, відновлювані джерела енергії, ринок електричної енергії, порівняльний аналіз, імітаційне моделювання.

**Вступ.** На виконання Закону «Про ринок електричної енергії» [1] в Україні з 01 липня 2019 року функціонує новий ринок електричної енергії. Визначена Законом ринкова модель відповідає загальноприйнятій європейській моделі та вимогам третього енергетичного пакету. У цьому випадку в національних ринках електроенергії європейських країн практикують додаткове використання різних механізмів стимулювання або підтримки учасників ринку в межах реалізації окремих загальнодержавних програм. Так, у 2009 році Україна взяла на себе гарантовані законодавчо зобов'язання до 2030 року купувати за «зеленим» тарифом всю електроенергію [2], відпущену станціями з відновлюваними джерелами енергії (ВДЕ). До основних складових цих зобов'язань відносяться: купівля відпущеної ВДЕ електроенергії за фіксованим «зеленим» тарифом; купівля електричної енергії єдиним державним підприємством; стовідсоткові та своєчасні розрахунки за викуплену електроенергію. Таким чином, у нову ринкову модель закладено функції принципово нового учасника ринку електроенергії – Гарантованого покупця (ГП). Цей учасник має купувати за «зеленим» тарифом всю електроенергію з ВДЕ у повному обсязі та реалізовувати передбачені Законом механізми компенсації такого тарифу.

З огляду на це, а також на стрімке зростання частки ВДЕ в загальному балансі ОЕС України актуальною задачею, що сьогодні потребує розв'язання, є побудова моделей та засобів оцінки впливу ВДЕ на ринкову вартість електроенергії в Україні з урахуванням вимог чинного законодавства, технологічних обмежень функціонування ВДЕ та процесів на ринку електричної енергії.

**Метою статті** є огляд основних функцій Гарантованого покупця, переваг та проблем розвитку ВДЕ в частині їхнього впливу на процеси ціноутворення в сегментах ринку електроенергії України та визначення складових комплексної моделі задля аналізу впливу ВДЕ на ринкову вартість електроенергії.

**Функції гарантованого покупця.** Модель функціонування ГП та закладені в неї функції можна розглядати як адаптацію відповідної італійської моделі стимулювання «зеленої» енергетики до умов українського законодавства та особливостей українських енергосистем. До основних функцій ГП віднесено: продаж в сегменті ринку «на добу наперед» (РДН) та внутрішньодобовому ринку (ВДР) викупленої у станцій з ВДЕ електроенергії, а також перепродаж у цих ринкових сегментах електроенергії, викупленої на спеціалізованих аукціонах, з метою компенсації різниці між ринковою вартістю електроенергії та «зеленими» тарифами. Крім того, до функцій ГП віднесено врегулювання створюваних ВДЕ небалансів та врахування їхньої вартості у розрахунках з виробниками ВДЕ. Ця функція ГП фактично реалізує передбачені Законом функції балансуєчої групи.

© Іванов Г.А., Блінов І.В., Парус Є.В., Мірошник В.О., 2020

ORCID ID: \*<https://orcid.org/0000-0001-8010-5301>; \*\*<https://orcid.org/0000-0001-9087-3902>;

\*\*\*<https://orcid.org/0000-0001-9036-7268>

**Балансуюча група гарантованого покупця.** Сучасна модель ринку передбачає обов'язковість функціонування сегменту балансуючого ринку (БР), де узгоджуються небаланси, що виникли між заявленими та фактичними обсягами виробництва/споживання електроенергії у формі купівлі/продажу відповідних обсягів небалансів. Таким чином, ГП бере участь у сесіях БР як сторона, відповідальна за баланс для виробників з ВДЕ. Сумарний небаланс ВДЕ розраховується як сальдоване значення всіх фактичних відхилень від прогнозного графіку кожного виробника ВДЕ, що входить до цієї балансуючої групи. Учасники балансуючої групи, у свою чергу, мають компенсувати ГП витрати на врегулювання небалансів.

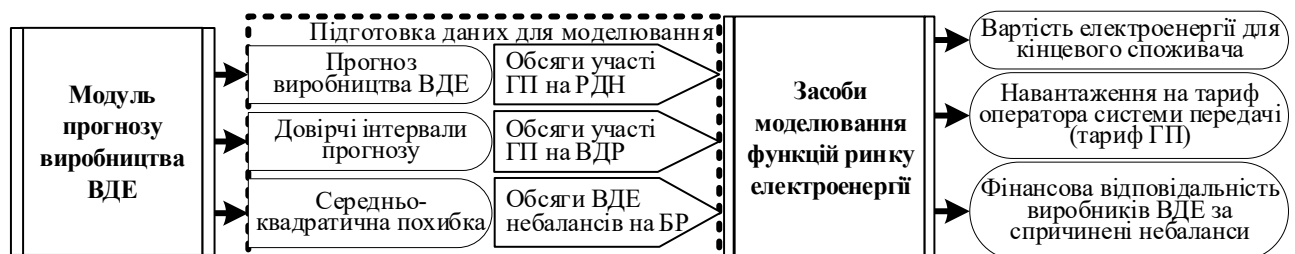
Наразі виробники з ВДЕ не несуть відповідальності за створювані ними небаланси, оскільки Законом визначено перехідний період на поступове впровадження такої відповідальності. Так для станцій з ВДЕ, введених у дію до 11.06.2017 р., відповідальність за небаланси вводиться після 2030 року. Інші виробники починають компенсувати свої небаланси з 2021 року з перехідним періодом до 2030 року. У цей період частка небалансів, що підлягає компенсації, щорічно збільшується на 10% від загального обсягу небалансу. Передбачено також граничні обсяги допустимих відхилень від заявленого графіку, які враховують принципову можливість прогнозу обсягів відпуску електроенергії для ВДЕ різних типів. Так, до 31 грудня 2029 року компенсація вартості небалансів здійснювалася за умови похибки прогнозу для ВЕС більше 20%, СЕС – більше 10% та малих ГЕС – більше 5%. За умови досягнення виробниками з ВДЕ частки 5% і більше у річному балансі виробництва електричної енергії значення допустимих відхилень знижуються до 10% для ВЕС та 5% – для СЕС. Згідно діючого порядку, обсяг відшкодування виробником за «зеленим» тарифом ГП частки вартості врегулювання небалансу у розрахунковий період розраховується пропорційним розподілом витрат на покриття небалансів між учасниками балансуючої групи ГП. У цьому випадку відшкодуванню вартості небалансів підлягають лише відхилення від прогнозу, які збігаються за знаком із загальним відхиленням всієї балансуючої групи. В той же час відповідальність за небаланс інших учасників ринку розраховується для кожного учасника ринку окремо.

Виконані дослідження показали, що для ОЕС України характерна нерівномірність розподілу встановленої потужності ВДЕ, зокрема більше 1500 МВт встановленої потужності (29% від загальної встановленої потужності) припадає на 20 станцій (3,6% від загальної кількості електростанцій). За таких умов у великих виробників з ВДЕ з'являється стимул та можливість до маніпулювання значеннями прогнозованого відпуску електроенергії, що призводитиме до спотворення механізмів розподілу відповідальності за неточне прогнозування та ускладнюватиме розвиток такої генерації. Тому діючі механізми розподілу відповідальності за небаланси між учасниками ринку електроенергії України потребують удосконалення з метою усунення цього та інших недоліків, що посилює актуальність проблеми оцінки комплексного впливу на ринкову вартість електроенергії окремих типів ВДЕ та окремих виробників «зеленої» електроенергії.

**Переваги та проблеми розвитку ВДЕ в частині їхнього впливу на процеси ціноутворення в сегментах ринку електроенергії України.** До основних позитивних наслідків активного впровадження ВДЕ в електроенергетиці України, вочевидь, відноситься зменшення потреби у викопних ресурсах під час виробництва електроенергії, що призводить до зниження викидів CO<sub>2</sub>, зокрема на ТЕС. В частині впливу на ринок електроенергії слід виділити те, що обов'язкові до викупу в сегменті РДН обсяги пропозиції від ВДЕ зміщують пропозицію інших виробників, стимулюючи помітне зменшення маржинальних цін на РДН, які є важливою складовою у загальній вартості електроенергії для кінцевих споживачів. Проте, разом із позитивними результатами, збільшення частки ВДЕ у структурі виробничих потужностей обумовило появу і ряду негативних тенденцій, пов'язаних, передусім, з нерегульованими, різко змінними графіками відпуску електроенергії станціями з ВДЕ в умовах незадовільної якості прогнозування таких графіків, а саме: збільшення потреби в резервах на балансування режимів ОЕС України призводить як до скорочення пропозиції і підвищення цін в організованих сегментах ринку, так і до збільшення тарифу оператора системи передачі; внесені ВДЕ додаткові небаланси спричиняють збільшення обсягів балансування режимів ОЕС України та цін на БР, що призводить до збільшення як ціни небалансів, так і їхньої загальної вартості. Збільшення обсягів резервів на регулювання режимів ОЕС України призводить також до необхідності заміщення відносно дешевих потужностей АЕС маневреними вугільними енергоагрегатами, що спричиняє подальше збільшення вартості електроенергії та збільшення викидів CO<sub>2</sub>. Збільшення частки ВДЕ у структурі виробничих потужностей ОЕС України передусім посилює проблеми регулювання режимів. У той же час, вплив пропозиції електроенергії від виробників з ВДЕ

на процесі ціноутворення в сегментах ринку електроенергії має складний неоднозначний характер. Тому для прийняття рішень щодо подальшого розвитку ВДЕ необхідно виконувати дослідження причинно-наслідкових зв'язків такого впливу. Вирішення проблем, пов'язаних з розвитком ВДЕ, потребує розв'язання ряду організаційних, технологічних та наукових задач. Мова іде, зокрема, про впровадження аукціонів щодо встановлення нових потужностей ВДЕ та запровадження фінансової відповідальності за створені небаланси, впровадження в ОЕС України високоманеврових генераторів з низьким рівнем викидів вуглецю, а також систем накопичення електричної енергії для потреб регулювання режимів [3]. До нагальних науково-практичних задач відносяться: розробка методів та засобів для поліпшення якості прогнозу обсягів відпуску електроенергії станціями з ВДЕ [4], а також розробка методів та засобів аналізу складових впливу збільшеної частки ВДЕ у структурі виробництва електроенергії на процесі ціноутворення в сегментах ринку електроенергії України.

**Складові моделі для аналізу впливу ВДЕ на ринкову вартість електроенергії.** Дослідження складових впливу підвищеної частки ВДЕ у структурі виробничих потужностей на ринкову вартість електроенергії в Україні пропонується здійснювати шляхом порівняльного аналізу результатів функціонування ринку електроенергії України за різних обсягів відпуску електроенергії ВДЕ. Відповідно, для аналізу окремих варіантів такого впливу необхідні засоби прогнозування відпуску електроенергії з ВДЕ та засоби імітації процесів ціноутворення в сегментах ринку електроенергії України (див. рис.), враховуючи, що для участі в організованих сегментах ринку гарантованому покупцю необхідні прогнози погодинного сумарного відпуску ВДЕ з упередженням від 1 до 48 год [4].



Модуль прогнозу виробництва електроенергії ВДЕ здійснює моделювання таких даних: агрегований погодинний графік на добу наперед виробництва електроенергії електростанціями з ВДЕ; довірчі інтервали прогнозу агрегованого графіка виробництва електроенергії електростанціями з ВДЕ; середньоквадратична похибка прогнозу. Агрегований погодинний графік на добу наперед виробництва електроенергії електростанціями з ВДЕ використовується для визначення обсягів продажу електроенергії ГП у сегменті РДН. Значення довірчих інтервалів прогнозу дають змогу розрахувати обсяги купівлі/продажу електроенергії ГП у сегменті ВДР. Значення середньоквадратичної похибки використовуються задля розрахунку обсягів небалансів, що виникли внаслідок неточності прогнозування виробництва ВДЕ. У свою чергу, обсяги небалансів використовуються для моделювання процедур врегулювання небалансів у сегменті БР та розрахунку вартості таких небалансів. Розраховані дані використовуються для моделювання поведінки ГП в модулях імітаційного моделювання процесів ціноутворення в сегментах ринку електроенергії України. За результатами такого моделювання визначаються наступні основні показники: вартість електроенергії для кінцевого споживача як основний критерій порівняльного аналізу варіантів впливу електростанцій ВДЕ на ринкову вартість електроенергії; обсяги платежів ГП електростанціям з ВДЕ; обсяги відшкодувань електростанціями з ВДЕ похибки у прогнозуванні виробництва електроенергії понад нормативних значень. Наведені показники є найбільш індикативними щодо порівняння різних варіантів впливу на ринок електроенергії як електростанцій з ВДЕ в цілому, так і для окремих об'єктів з ВДЕ.

**Висновки.** Аналіз нормативно-правової бази України та ЄС в частині організації роботи ринків електроенергії показав, що, в цілому, механізм ГП реалізує державні зобов'язання перед інвесторами «зеленої» енергетики та ефективно виконує роль сторони, відповідальної за небаланси, виробників з ВДЕ. За результатами аналізу складових впливу пропозиції ВДЕ на процеси ціноутворення відзначено складний та неоднозначний характер такого впливу. Серед переліку способів вирішення пов'язаних зі збільшенням частки ВДЕ проблем відокремлено необхідність аналізу складових впливу пропозиції від станцій з ВДЕ на ринкову вартість електроенергії та визначено основні складові засобів імітації процесів ціноутворення в сегментах ринку електроенергії України, практична реалізація яких дають змогу створити ефективний інструментарій задля підготовки обґрунтованих управлінських рішень щодо вирішення пов'язаних з розвитком ВДЕ проблем.

Роботу виконано за рахунок коштів бюджетної програми «Науково-технічні та економіко-екологічні засади низько вуглецевого розвитку України» (КПКВК 65411030).

1. Про ринок електричної енергії. Закон України від 13.04.2017 № 2019-VIII. URL: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/2019-19> (дата звернення: 29.04.2019).
2. Про альтернативні джерела енергії. Закон України від 20.02.2003. № 555-IV. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/555-15>. (дата звернення: 29.04.2019).
3. Буткевич О.Ф., Юнєєва Н.Т., Гурєєва Т.М. До питання про розміщення накопичувачів енергії в ОЕС України. *Технічна електродинаміка*. 2019. № 6. С. 59-64. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.06.059>
4. Блінов І.В., Мірошник В.О., Шиманюк П.В. Короткостроковий інтервальний прогноз сумарного відпуску електроенергії виробниками з відновлювальних джерел енергії. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2019. Вип. 54. С. 5-12. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2019.54.005>

## СОСТАВЛЯЮЩИЕ МОДЕЛИ ДЛЯ АНАЛИЗА ВЛИЯНИЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ НА РЫНОЧНУЮ СТОИМОСТЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В УКРАИНЕ

Г.А. Иванов<sup>1</sup>, И.В. Блинов<sup>2</sup>, докт. техн. наук, Е.В. Парус<sup>2</sup>, канд. техн. наук, В.А. Мирошник<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Государственное предприятие «Гарантирующий покупатель»,  
ул. Симона Петлюры, 56, Киев, 03680, Украина.

E-mail: [gennadiy\\_i@icloud.com](mailto:gennadiy_i@icloud.com)

<sup>2</sup> Институт электродинамики НАН Украины,  
пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина.

E-mail: [blinovigor81@gmail.com](mailto:blinovigor81@gmail.com); [paruseugene@gmail.com](mailto:paruseugene@gmail.com); [miroshnyk.volodymyr@gmail.com](mailto:miroshnyk.volodymyr@gmail.com)

*Рассмотрены организационные основы и функции балансирующей группы Гарантированного покупателя как основного механизма реализации государственной программы поддержки развития производителей с возобновляемыми источниками энергии. Проанализированы основные преимущества и недостатки таких объектов в части их влияния на процессы ценообразования в организованных сегментах рынка электроэнергии Украины. Определены общие подходы к решению проблем, возникающих в условиях повышения доли производства электроэнергии из возобновляемых источников в Украине. Предложены подходы к построению средств анализа факторов влияния объемов отпущенной станциями с возобновляемыми источниками производства электроэнергии на процессы ценообразования в организованных сегментах рынка электроэнергии Украины. Библ. 4, рис. 1.*

**Ключевые слова:** гарантированный покупатель, возобновляемые источники энергии, рынок электрической энергии, сравнительный анализ, имитационное моделирование.

## COMPONENTS OF MODEL FOR ANALYSIS OF INFLUENCE OF RENEWABLES ON THE ELECTRICITY MARKET PRICE IN UKRAINE

H.A. Ivanov<sup>1</sup>, I.V. Blinov<sup>2</sup>, E.V. Parus<sup>2</sup>, V.O. Miroshnyk<sup>2</sup>

<sup>1</sup> State Company “Guaranteed buyer”,  
st. Simon Petlyury, 56, Kyiv, 03680, Ukraine.

E-mail: [gennadiy\\_i@icloud.com](mailto:gennadiy_i@icloud.com)

<sup>2</sup> Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,  
Peremohy ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine.

E-mail: [blinovigor81@gmail.com](mailto:blinovigor81@gmail.com); [paruseugene@gmail.com](mailto:paruseugene@gmail.com); [miroshnyk.volodymyr@gmail.com](mailto:miroshnyk.volodymyr@gmail.com)

*The organizational basis and functions of the balancing group of the Guaranteed Buyer are considered as the main mechanism for implementing the state program to support the development of producers with renewable energy sources. The main advantages and disadvantages of such objects in terms of their influence on the pricing processes in organized segments of the electricity market of Ukraine are analyzed. The general approaches to solving problems arising in the face of increasing the share of electricity production from renewable sources in Ukraine are identified. Approaches to the means for analyzing the factors affecting the volumes supplied by stations with renewable sources on the pricing in organized segments of the electricity market of Ukraine are proposed. References 4, figure 1.*

**Keywords:** guaranteed buyer, renewable energy sources, electricity market, comparative analysis, simulation model

1. On Electricity Market. The Law of Ukraine. 13.04.2017 No 2019-VIII. URL: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/2019-19>. (accessed: 29.04.2019). (Ukr)

2. On Alternative Energy Sources. The Law of Ukraine. 20.02.2003. № 555-IV. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/555-15>. (accessed: 29.04.2019). (Ukr)

3. Butkevych O.F., Yuniieieva N.T., Hurieieva T.M. On the issue of energy storages placement in the IPS of Ukraine. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2019. No 6. Pp. 59-64. (Ukr). DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.06.059>

4. Blinov I., Miroshnyk V., Shymaniuk P. Short-term interval forecast of total electricity generation by renewable energy sources producers. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2019. No 54. Pp. 5-12. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2019.54.005>

Надійшла 28.02.2020  
Остаточний варіант 04.05.2020

## ВПЛИВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА ЕКОНОМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ІЗОЛЬОВАНИХ MICROGRID

Ю.С. Ямненко\*, докт.техн.наук, Т.О. Терещенко\*\*, докт.техн.наук, І.С. Федін\*\*\*, Л.Є. Клепач\*\*\*\*  
НТУ України «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського»  
пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна,  
e-mail: [tereshchenko50.t.a@gmail.com](mailto:tereshchenko50.t.a@gmail.com)

*Досліджено вплив параметрів якості електроенергії на економічні характеристики систем розподіленої генерації, зокрема, на дохід від використання відновлювальних джерел живлення в ізольованих MicroGrid типу айленд. Для цього методом Лагранжа вирішено задачу максимізації доходу з урахуванням обмежень конкретної системи живлення за різних значень коефіцієнтів корисної дії та нелінійних спотворень напруги, що живить навантаження змінного струму. Вихідними даними, крім кількості генераторів, навантажень та характеристик їхніх режимів, є прогноз споживання/генерації та локальні «умовні» тарифи на електроенергію відновлювальних джерел у складі MicroGrid. Результатом рішення є визначення коефіцієнтів використання генераторів та навантажень на кожному інтервалі добової діаграми. Отримані коефіцієнти визначають або включений/відключений стан, або частку енергії, на яку працює елемент системи живлення на інтервалі та слугують основою алгоритму керування системою MicroGrid за вартісним критерієм.*

Бібл. 7, рис. 1.

**Ключові слова:** MicroGrid типу айленд, системи розподіленої генерації, відновлювані джерела енергії, коефіцієнти корисної дії та нелінійних спотворень

MicroGrid типу айленд [1] – це автономні системи електроживлення, не пов'язані між собою традиційною комунальною мережею. Згідно з результатами досліджень за програмою Microgrid Deployment Tracker 2Q19, проведеними компанією Navigant Research, в цю категорію потрапляє близько 41% всього світового ринку Microgrid [1]. Системи типу айленд широко розповсюджені в промислово розвинених країнах, які часто зазнають впливу стихійного лиха, мають пересічений ландшафт або острівне розташування, що ускладнює застосування традиційних рішень з енергопостачання. Для таких систем MicroGrid з альтернативними та відновлюваними джерелами енергії (ВДЕ) актуальним є пошук шляхів підвищення вартісної та економічної ефективності використання енергоресурсів із одночасним збереженням необхідних параметрів якості електроенергії.

Метою роботи є аналіз впливу параметрів якості (коефіцієнтів корисної дії (ККД) та коефіцієнтів гармонічних спотворень напруги (*THD* – Total Harmonic Distortion) на дохід від використання ВДЕ та розробка способу керування навантаженнями і генераторами MicroGrid із максимізацією доходної цільової функції.

Дохід визначається як різниця між доходами від ВДЕ та витратами в навантаженнях MicroGrid. Дохідна частина визначається як умовний тариф електроенергії, помножений на відповідний обсяг електроенергії від ВДЕ. Витрати визначаються як сума добутоків потужностей навантажень та ціни на електроенергію для кожного інтервалу часової діаграми.

Керування складовими елементами MicroGrid має здійснюватися відповідно до поставленої екстремальної задачі із заданим вартісним критерієм ефективності з урахуванням обмежень. Для цього попередньо необхідно вирішити задачі прогнозування споживання і генерації енергії та визначити локальні «умовні» тарифи на електроенергію від ВДЕ задля забезпечення внутрішнього балансу вартісних показників айленд-систем [2]. Вихідними даними для алгоритмів керування MicroGrid, крім кількості генераторів, навантажень та характеристик їхніх режимів, є прогноз споживання/генерації на певний період (наприклад, добу) та вартість електроенергії [3]. Прогнозні дані постійно коригуються у відповідності з вимірними у реальному часі значеннями.

Під час побудови алгоритмів керування режимами навантажень та генераторів, які забезпечують максимізацію однієї з заданих величин (наприклад, потужності чи прибутку) або мінімізацію (наприклад, витрат) з урахуванням обмежень, використовуються математичні методи знаходження

---

© Ямненко Ю.С., Терещенко Т.О., Федін І.С., Клепач Л.Є., 2020  
ORCID ID: \*<https://orcid.org/0000-0002-9796-6420>;\*\*<https://orcid.org/0000-0003-4009-2854>;  
\*\*\*<https://orcid.org/0000-0003-0264-5067>\*\*\*\*<https://orcid.org/0000-0002-3026-3755>

умовного локального екстремуму, зокрема метод золотого перерізу, метод Ньютона (надалі розвинутий у метод хорд), симплекс-метод, метод невизначених коефіцієнтів Лагранжа [4]. Для вирішення задачі максимізації оберемо останній, який дає точний розв'язок та працює з виразами будь-якого порядку. Він дає змогу звести задачу на відшукування умовного екстремуму (екстремуму за заданих умов) до задачі на знаходження безумовного екстремуму.

Запишемо екстремальну задачу для  $M$  первинних відновлюваних джерел енергії (сонячних панелей та вітрогенераторів),  $W$  вторинних джерел (акумуляторів в режимі розряду),  $L$  регульованих навантажень та  $N$  нерегульованих навантажень у наступному вигляді:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^s \left( \sum_{w=0}^W \eta_{\partial w,i} P_{\partial w,i} g_{w,i} + \sum_{j=0}^M G_{j,i} P_{\text{пд}j,i} - \sum_{k=0}^L U_{k,i} P_{\text{нк},i} - \sum_{p=0}^N V_{p,i} P_{\text{ck},i} \right) \Delta t C_{\partial w,i} \rightarrow \max \\ \sum_{k=0}^L \frac{U_{k,i} P_{\text{нк},i}}{\eta_{\text{нк},i}} + \sum_{p=0}^N V_{p,i} P_{\text{ck},i} = \sum_{w=0}^W \eta_{\partial w,i} P_{\partial w,i} g_{w,i} + \sum_{j=0}^M G_{j,i} P_{\text{пд}j,i} \Big|_{i=1}^s \\ \sum_{k=0}^L \eta_{\text{нк},i} U_{k,i} P_{\text{нк},i} = \text{const} \Big|_{i=1}^s \end{array} \right. .$$

Перше рівняння системи описує умову максимального прибутку від використання генераторів, друге відображає баланс потужностей, третє – обмеження на задану роботу на інтервалах (залежить від призначення системи електроживлення та її елементів). У цій системі прийнято наступні позначення:  $C_{\partial w,i}$  – ціна на електроенергію (визначається тарифами – заданими або локальними «умовними» для MicroGrid типу айленд);  $\Delta t$  – тривалість інтервалу (наприклад, 1 година);  $s$  – кількість інтервалів за замовчанням (наприклад, 24 для однієї доби);  $P_{\text{ck},i}$  та  $P_{\text{нк},i}$  – потужність регульованих і нерегульованих навантажень відповідно;  $P_{\partial w,i}$  та  $P_{\text{пд}j,i}$  – потужність вторинних та первинних джерел відповідно;  $\eta_{\text{нк},i}$  та  $\eta_{\partial w,i}$  – ККД навантажень та генераторів;  $i=1 \dots s$ .

Розв'язком системи є значення чотирьох типів коефіцієнтів на  $i$ -му інтервалі добової діаграми, за яких досягається максимальний дохід від використання ВДЕ: коефіцієнтів  $G_{j,i}$  ( $j=1, \dots, M$ ) використання  $j$ -го первинного джерела ВДЕ (1 – якщо підключено та 0 – якщо ні); коефіцієнтів,  $g_{w,i}$  ( $w=1, \dots, W$ ) використання вторинного джерела у діапазоні  $[0;1]$ ; коефіцієнтів  $V_{p,i}$  ( $p=1, \dots, N$ ) для нерегульованих навантажень (1 – якщо підключено та 0 – якщо ні); коефіцієнтів  $U_{k,i}$  ( $k=1, \dots, L$ ) для регульованих навантажень у діапазоні  $[0;1]$ ; ці значення відображають, на яку частку від максимальної потужності працює споживач на даному інтервалі.

Для кожного коефіцієнту визначаються добові діаграми. Розраховані значення є основою алгоритмів керування джерелами і навантаженнями на базі прогнозу електроспоживання та генерації електроенергії від ВДЕ, причому прогнозні значення постійно коригуються. Таким чином, рішення екстремальної задачі зводиться до рішення системи лінійних алгебраїчних рівнянь традиційними методами.

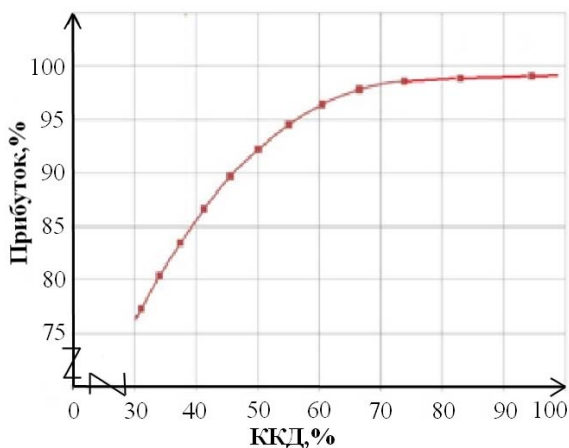


Рис. 1

Вплив ККД на дохід. Зазначимо, що згідно (1) в оптимізаційну задачу входять ККД джерел та генераторів, тому вплив ККД на дохід можна знайти, вирішивши рівняння (1) для різних значень ККД.

Для спрощення оцінки розглянемо рішення рівняння (1) на одному інтервалі для одного навантаження. На рис. 1 показано залежність відносного доходу від ВДЕ для систем з різними ККД. За 100% прийнято систему з ККД, близьким до 1. Характеристики навантажень взято з таблиці 3.4 роботи [5].

З рис. 1 видно, що при високих значеннях ККД (0,7-0,9) відносний дохід майже не змінюється. Чим нижче ККД вихідного каскаду системи живлення, тим

меншим є дохід. За ККД=60% дохід зменшується на 7%; за 30% – на 25% в порівнянні з системою з ККД, близьким до 1.

**Вплив THD.** У MicroGrid типу айленд для узгодження мереж DC/AC використовуються трифазні багаторівневі інвертори. Значення THD відомих схем лежить в межах 30-22% (для 5-рівневого інвертора). Авторами розроблено спосіб формування напруги багаторівневого інвертора, який забезпечує зменшення рівня гармонічного спотворення вихідної напруги схемами до 14,73% (без врахування вихідних фільтрів) [6]. Вплив THD перетворювачів на дохід від ВДЕ в автономних системах оцінимо наступним чином: обчислимо втрати потужності  $\Delta P$  від вищих гармонік [7] та відповідне зменшення ККД як  $\Delta \eta_{0k,i} = \Delta P / P_{in}$ ; вирішимо оптимізаційну задачу з новими значеннями ККД  $\Delta \eta_{nk,i} = \eta_{0k,i} - \Delta \eta_{0k,i}$ . В результаті обчислень визначено, що зменшення THD для вихідного інвертора системи живлення з 30,06% (аналог) до 14,73% (винахід [6]) призводить до збільшення доходу від використання ВДЕ в межах від 1 до 5% в залежності від початкових втрат потужності, не пов'язаних з вищими гармоніками.

**Висновки.** Розроблено спосіб керування об'єктами MicroGrid типу айленд за вартісним критерієм на базі прогнозу електроспоживання та генерації електроенергії від ВДЕ, який полягає у вирішенні оптимізаційної задачі для визначення коефіцієнтів використання генераторів і навантажень та керування ними. Досліджено вплив ККД та THD на дохід від використання ВДЕ. Продемонстровано характер зменшення рівня доходу від застосування ВДЕ у разі зменшення ККД: за значення ККД=60% дохід зменшується на 7%; за 30% – на 25% у порівнянні з системою з ККД, близьким до 1. Визначено збільшення доходу від використання ВДЕ зі зменшеним рівнем THD, що лежить в межах 1-5% в залежності від початкових втрат потужності, не пов'язаних з вищими гармоніками.

1. Taking Stock of Leading Innovators in Global Remote Microgrid Markets. MGP Newsletter. 2019.  
URL: <https://minigrids.org/taking-stock-of-leading-innovators-in-global-remote-microgrid-markets/>
2. Zhuikov V., Yamnenko J., Tereshchenko T., Klepach L., Voiko I. Static and Dynamic Tariffing Electric Power Autonomous Microgrid. *Journal of Present Problems of Power System Control, Scientific Papers of the Department of Electrical Power Engineering of Wrocław University of Technology*. 2016. No 7. Pp. 29-41.  
URL: <http://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-74a78806-232d-49fa-a1f0-e91d6662ea0d>
3. Клепач Л.С. Керування електроспоживанням за техніко-економічними показниками. VIII Міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених *Електроніка-2015*. Київ. 2015. С. 227–231.  
URL: <http://elconf.kpi.ua/wp-content/uploads/2016/03/ELCONF-2015.pdf>
4. Акулич И. Л. Математическое программирование в примерах и задачах. М.: Высшая школа, 1986. 319 с.
5. ДБН В.2.5-23:2010. Проектування електрообладнання об'єктів цивільного призначення.  
URL: <http://kbu.org.ua/assets/app/documents/dbn2/92.1>
6. Терещенко Т.О., Ямненко Ю.С., Лайкова Л.Г., Федін І.С. Спосіб формування трифазної напруги. Патент України. № 136713. 2019.
7. Півняк Г.Г., Жежеленко І.В., Папаїка Ю.А. Енергетична ефективність систем електропостачання. Дніпро: НТУ «ДП», 2018. 148 с.

УДК 621.314:657

## **ВЛИЯНИЕ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗОЛИРОВАННЫХ MICROGRID**

**Ямненко Ю.С.,** докт. техн. наук, **Терещенко Т.А.,** докт. техн. наук, **Федин И.С.,** Клепач Л.Е.  
НТУ Украины «Киевский политехнический институт им. И. Сикорского»  
пр. Победы, 37, Киев, 03056, Украина,  
e-mail: [tereshchenko50.t.a@gmail.com](mailto:tereshchenko50.t.a@gmail.com)

*Исследовано влияние параметров качества электроэнергии на экономические характеристики систем распределенной генерации, в частности, на доход от использования возобновляемых источников питания в изолированных MicroGrid типа айленд. Для этого методом Лагранжа решена задача максимизации дохода с учетом ограничений конкретной системы питания при различных значениях коэффициентов полезного действия и нелинейных искажений напряжения, питающего нагрузку переменного тока. Исходными данными, кроме количества генераторов, нагрузок и характеристик их режимов, является прогноз потребления/генерации и локальный «условный» тариф на электроэнергию возобновляемых источников. Результатом решения является определение коэффициентов использования генераторов и нагрузок на каждом интервале*



суточной диаграммы. Полученные коэффициенты определяют состояние «включе-но/отключено» или долю энергии, на которую работает элемент системы питания на данном интервале, и служат основой алгоритмов управления системой MicroGrid по стоимостному критерию. Библ. 7, рис. 1.

**Ключевые слова:** MicroGrid типа айленд, системы распределенной генерации, возобновляемые источники энергии, коэффициенты полезного действия и нелинейных искажений

УДК 621.314:657

## THE INFLUENCE OF ELECTRICAL ENERGY QUALITY TO ECONOMIC CHARACTERISTICS OF ISOLATED MICROGRID

Yamnenko Y.S., Tereshchenko T.O., Fedin I.S., Klepach L.E.

National Technical University of Ukraine Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

37, Peremohy ave., Kyiv, 03056, Ukraine,

e-mail: [tereshchenko50.t.a@gmail.com](mailto:tereshchenko50.t.a@gmail.com)

*The impact of quality parameters of electrical energy to the economic characteristics of distributed generation systems, in particular on the profits from renewable power sources in isolated islanded MicroGrid, has been investigated. For this purpose, the Lagrange method was used to solve the task of profit maximization taking into account the limitations of the power supply system at different values of efficiency factors and nonlinear distortions of the AC supply load. The initial data for this task includes, in addition to the number of generators, loads and characteristics of their modes, also the forecasted values of consumption/generation and the local “conditional” cost of renewable energy sources. The result of the solution is the determination of generator coefficients and loads at each interval of the daily chart. The obtained coefficients determine on/off state or share of energy on which the power supply system element is working in the interval. These resulting values are used as the basis of the algorithm to control MicroGrid system by cost criterion. References 7, figures 1.*

**Keywords:** islanded MicroGrid, distributed generation systems, renewable energy sources, efficiency factors and nonlinear distortions

1. Taking Stock of Leading Innovators in Global Remote Microgrid Markets. MGP Newsletter. 2019.  
URL: <https://minigrids.org/taking-stock-of-leading-innovators-in-global-remote-microgrid-markets/>
2. Zhuikov V., Yamnenko J., Tereshchenko T., Klepach L., Boiko I. Static and Dynamic Tariffing Electric Power Autonomous Microgrid. *Journal of Present Problems of Power System Control, Scientific Papers of the Department of Electrical Power Engineering of Wroclaw University of Technology*. 2016. No 7. Pp. 29-41.  
URL: <http://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-74a78806-232d-49fa-a1f0-e91d6662ea0d>
3. Klepach L. Power consumption management according to technical and economic indicators. VIII International Scientific and Technical Conference of Young Scientists *Electronics-2015*. Kyiv. 2015. Pp. 227–231 (Ukr)  
URL: <http://elconf.kpi.ua/wp-content/uploads/2016/03/ELCONF-2015.pdf>
4. Akulich I.L. Mathematical programming in examples and tasks. Moskva: Vysshaya shkola, 1986. 319 p. (Rus)
5. DBN V.2.5-23:2010. Design of electrical equipment for civil purposes. (Rus)  
URL: <http://kbu.org.ua/assets/app/documents/dbn2/92.1>
6. Tereshchenko T.O., Yamnenko Yu.S., Laikova L.H., Fedin I.S. Method of forming three-phase voltage. Patent of Ukraine. No 136713. 2019 (Ukr) URL: <https://sis.ukrpatent.org/uk/search/detail/1374162/>
7. Pivniak H.H., Zhezhelenko I.V., Papaika Yu.A. Energy efficiency of power supply systems. Dnipro: NTU DP, 2018. 148 p. (Ukr)

Надійшла 28.02.2020  
Остаточний варіант 06.05.2020

МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ  
В ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ

Сонг Венгуанг<sup>1\*</sup>, Андрущак В.С.<sup>2\*\*</sup>, Кайдан М.В.<sup>2\*\*\*</sup>, Бешлей М.І.<sup>2\*\*\*\*</sup>, Кочан О.В.<sup>1,2\*\*\*\*\*</sup>,  
Су Цзюнь<sup>3\*\*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup> School of Computer Science, Yangtze University,  
Jingzhou, 434023, China, e-mail: [wenguang\\_song@yangtzeu.edu.cn](mailto:wenguang_song@yangtzeu.edu.cn)

<sup>2</sup> Національний університет “Львівська політехніка”,  
вул. Степана Бандери 12, Львів, 79013, Україна,  
e-mail: [mykola.i.beshlei@lpnu.ua](mailto:mykola.i.beshlei@lpnu.ua); [orestvk@gmail.com](mailto:orestvk@gmail.com)

<sup>3</sup> School of Computer Science, Hubei University of Technology,  
Wuhan, China.

*Запропоновано методику визначення комплексного параметру енергоспоживання для інфокомунікаційних мереж. На відміну від відомих, запропонована методика враховує гетерогенність та багатошаровість мережі. А також враховує параметр потужності, що витрачається під час простоювання мережевого обладнання в процесі обробки службових блоків даних, що є досить важливим завданням задля підвищення точності визначення енергоспоживання на етапі впровадження енергоефективної мережі. Згідно цієї методики розрахунок параметра енергоспоживання можна проводити для будь якої архітектури інфокомунікаційної мережі, конфігурації мережевих пристроїв та для обладнання від різних виробників. Бібл. 24, рис. 4.*

**Ключові слова:** енергоспоживання, інформаційно-комунікаційна мережа, DWDM, електрооптика, акустооптика, комутатор, модулятор.

**Вступ і постановка проблеми.** На сьогоднішній день телекомунікаційне обладнання споживає приблизно 5% електроенергії із загальної виробленої електричної потужності [1]. В свою чергу, попит на інформаційні послуги зростає і надалі, що призводить до зростання цього показника. Одним із ключових параметрів в галузі енергетики телекомунікацій є параметр енергоспоживання, під яким розуміється кількість електроенергії, що витрачається при передачі одного біта інформації між двома вузлами [2-5]. Визначення цього параметру є важливою задачею не тільки для зменшення необхідної кількості енергії телекомунікаційних мереж, а й для мережі в цілому. Є низка причин, що зумовлює зменшення енергоспоживання телекомунікаційних мереж [6]. У зв'язку із зростанням кількості абонентів та попиту на телекомунікаційні послуги, зростають вимоги до пропускної здатності мереж [7-9]. Однак власне енергетичне споживання мереж є важливішою проблемою у порівнянні з необхідною пропускною здатністю, оскільки саме енергоспоживання обмежує її зростання [10-11]. В додаток високошвидкісні транспортні оптичні мережі потребують надійних пристроїв обробки даних як на крайових, так і на граничних вузлах. При збільшенні швидкості передавання даних суттєво зростає енергоспоживання вузлів мережі через вище навантаження їхніх процесорів. Ці проблеми можуть стати одними з основних експлуатаційних перешкод і, в гіршому випадку, перешкодити наданню нових послуг і додатків [12]. Для забезпечення необхідної якості обслуговування ставляться вищі вимоги до комутаційних елементів мережі, тим самим зумовлюючи збільшення керуючих напруг цих пристроїв, що призводить до підвищення енергоспоживання мереж [13]. Крім того, підвищення напруг призводить до зменшення терміну надійної експлуатації пристроїв. Саме це змушує пошук і розробку нових методів, критеріїв, елементів і пристроїв мереж задля забезпечення необхідних їй робочих параметрів, при чому із невеликими капітальними та операційними витратами для оператора та високим сервісом обслуговування (QoS) для абонентів. Таким чином, актуальним завданням є

© Су Цзюнь, Андрущак В.С., Кайдан М.В., Бешлей М.І., Кочан О.В., Сонг Венгуанг, 2020  
ORCID ID: \*<https://orcid.org/0000-0003-1002-6709>; \*\*<https://orcid.org/0000-0002-2185-0923>;  
\*\*\*<https://orcid.org/0000-0002-9942-0229>; \*\*\*\*<https://orcid.org/0000-0002-7122-2319>;  
\*\*\*\*\*<https://orcid.org/0000-0002-3164-3821>; \*\*\*\*\*<https://orcid.org/0000-0002-4290-5049>

розроблення універсальної методики визначення параметру енергоспоживання, яка дасть змогу отримати даний параметр для будь якої архітектури інфокомунікаційної мережі, конфігурації мережевих пристроїв і для обладнання від різних виробників.

На сьогоднішній день існують методики, які дають змогу визначити і оцінити параметр енергоспоживання. Наприклад, центр енергоспоживання телекомунікацій в Мельбурнському університеті виділяє чотири підходи щодо вдосконалення мережевого енергоспоживання [14]: архітектурні, технологічні, протокольні, клаудні. Також в цій роботі у підрозділі «Дослідження вузьких місць транспортних оптичних мереж» надано приблизні витрати електроенергії для пристроїв як електричного, так і оптичного домену у разі обробці одного біта інформації. Проте у даній моделі не показано, яким чином повинне визначитися енергоспоживання мережі в цілому, а наведені значення енергоспоживання є наближеними і не враховують обладнання від різних виробників. Таким чином, запропонована Мельбурнським університетом модель передбачає низку підходів щодо зменшення енергоспоживання транспортних оптичних мереж з використанням приблизно знайдених значень енергоспоживання пристроїв цієї мережі.

Іншу модель, що будується на багаторівневій структурі транспортних оптичних мереж, розроблено Міланською політехнікою [15]. В ній враховано методики визначення енергоспоживання граничних і проміжних вузлів. Також ця модель враховує різні типи передачі обладнання від різних виробників і швидкість передачі даних. Проте, в ній не враховано потужність, яка витрачається під час простоювання обладнання, у процесі обробки службових блоків даних, що є досить важливо задля підвищення точності визначення енергоспоживання. Звідси випливає, що важливим науково-практичним завданням є розробка максимально точної універсальної методики розрахунку енергоспоживання у інформаційно-комунікаційних мережах з метою оптимального вибору необхідного мережевого обладнання задля побудови енергоефективних телекомунікаційних систем. Тому, **метою** роботи є розроблення універсальної методики розрахунку енергоспоживання в інфокомунікаційних системах, що враховує їхню гетерогенність та багатошаровість, а також потужність, що витрачається в умовах простоювання мережевого обладнання у процесі обробки службових блоків даних.

**Методика розрахунку енергоспоживання в інфокомунікаційних мережах.** На основі проведеного аналізу робіт [16-18] щодо розрахунку комплексного параметру енергоспоживання авторами визначено основні критерії, які впливають на енергетичне споживання інформаційно-комунікаційних систем, а саме: кількість та структура задіяних вузлів, вид транспортної технології, архітектура мережі, розмір блоку даних канального рівня, тип використовуваного обладнання, кількість проміжних оптоелектронних перетворень, тип комутації, використання хвильових конверторів, кількість та вид регенераційних пунктів, кількість хвиль WDM систем. На основі цих критеріїв сформовано комплексний параметр енергоспоживання (1) для однорідних мереж та (2) – для гетерогенної багатошарової мережі. В залежності від типу досліджуваної інформаційної мережі кожен критерій, що входить у (1) та (2), розраховуватиметься за певними математичними виразами. Послідовність математичних дій, спрямованих на розв'язання завдань дослідження, формує універсальну методику розрахунку енергоспоживання.

У процесі побудови однорідної мережі комплексний параметр енергоспоживання визначається

$$P_{p.c.} = M \cdot (2 \cdot P_{Edge} + N \cdot P_O + K \cdot P_E + P_{ROE} + P_{d\_time}) + P_{transp}, \quad (1)$$

де  $P_{p.c.}$  – загальне енергоспоживання мережі під час передачі інформаційних даних,  $P_{Edge}$  – споживання граничним вузлом,  $P_O$  і  $P_E$  – проміжними вузлами без і з проміжним оптоелектронним перетворенням, відповідно;  $N$  і  $K$  – кількість вузлів без і з проміжним оптоелектронним перетворенням,  $M$  – кількість блоків даних;  $P_{transp}$  – витрати електроенергії (далі – просто «витрати») на відкриття наскрізних каналів,  $P_{ROE}$  – витрати на регенераційне обладнання,  $P_{d\_time}$  – потужність, яка витрачається в умовах простоювання обладнання: тут і надалі одиницю вимірювання параметру енергоспоживання представлено у Ватах (Вт).

Сучасні інфокомунікаційні мережі володіють властивістю гетерогенності та багатошаровості. Трирівневу структуру транспортної інфокомунікаційної мережі з проміжним оптоелектронним перетворенням показано на рис. 1 та без проміжного оптоелектронного перетворення – на рис. 2.

Комплексний параметр енергоспоживання для цих систем може бути визначений як сумарні витрати електроенергії кожного із рівнів, що є альтернативою формулі (1)

$$P_{e.c.} = P_{\sum IP} + P_{\sum tr.l} + P_{\sum DWDM}, \quad (2)$$

де  $P_{\Sigma IP}$  – сумарні витрати електроенергії пристроями мережевого рівня,  $P_{\Sigma tr.l}$  – витрати каналного рівня,  $P_{\Sigma DWDM}$  – сумарні витрати обладнання DWDM на фізичному рівні з кінця в кінець мережі.

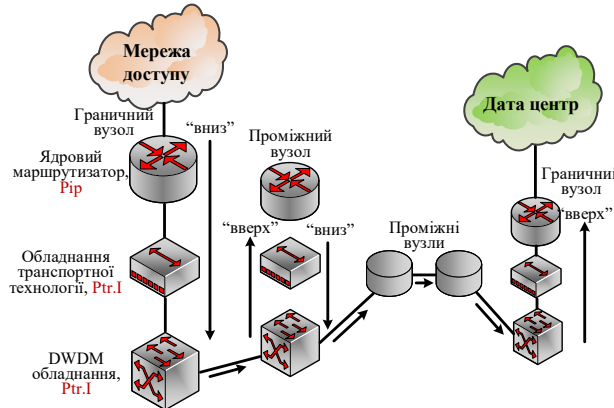


Рис. 1

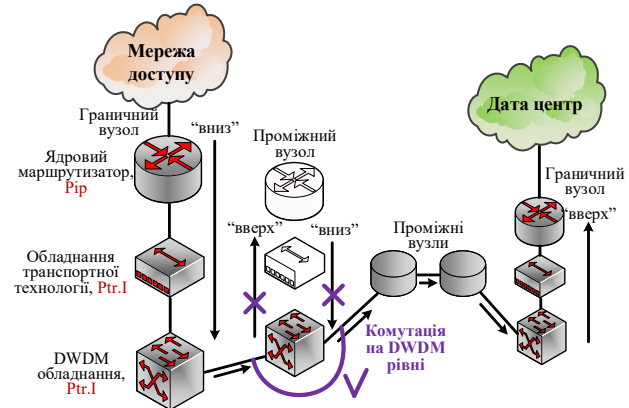


Рис. 2

Значення параметру енергоспоживання (Вт/біт) є відносно малою величиною, тому слід визначити, відносно якого блоку даних буде здійснюватися визначення цього параметру. Пропонуємо здійснювати розрахунок відносно блоку даних каналного рівня, оскільки розрахунок відносно IP пакету не дає змоги врахувати службову інформацію другого рівня, що вплине на розрахунок параметру енергоспоживання. В результаті задля визначення цього параметру слід скористатись формулою

$$P_{bit} = \frac{P_{p.c.}}{L_{block}} = \frac{M \cdot (2 \cdot P_{Edge} + N \cdot P_0 + K \cdot P_E + P_{ROE} + P_{d\_time}) + P_{transp}}{L_{block}}, \quad (3)$$

де  $L_{block}$  – довжина блоку даних каналного рівня (кількість біт блоку).

Для визначення споживання пристроїв, наведених у формулі (3), в методиці пропонується розділити енергетичне споживання пристроїв електричного і оптичного доменів. Розподіл відносно доменів здійснюється в залежності від виду сигналу, з яким працює пристрій. Відповідно для електричного домену мережі витрати задля обробки одного блоку даних становитимуть

$$P_{eqp.el(IP, tr.l)} = \frac{P_{max}}{N}, \quad (4)$$

де  $P_{max}$  – витрати мережевим пристроєм у разі його максимального завантаження (Вт/с),  $N$  – кількість блоків даних, яку може обробити пристрій (за 1 с).

Для пристроїв, що працюють на мережевому рівні (маршрутизатор),  $P_{max}$  визначається як [19]

$$P_{max}(v) = P_{Chas}(v) + \sum_{u=0}^{U_{Proc}} P_{Proc}(v_u) + \sum_{i=0}^{N_{LC}} P_{LC}(v_i), \quad (5)$$

де  $v$  – тип шасі, контролера, встановлених лінійних карт, конфігурації і профілю трафіку пристрою в залежності від швидкості передавання даних в компонентах маршрутизатора. Функція  $P_{Chas}(v)$  визначає енергетичне споживання шасі,  $U_{Proc}$  – кількість використовуваних контролерів,  $P_{Proc}(v_u)$  – енергетичне споживання певного типу контролера,  $N_{LC}$  – кількість використовуваних лінійних карт,  $P_{LC}(v_i)$  – енергоспоживання всіх лінійних карт в базовій конфігурації (фізичних інтерфейсів, портових адаптерів, комутаційних фабрик і модулів управління). Сума  $P_{LC}$  представляється у вигляді

$$\sum_{i=0}^{N_{LC}} P_{LC}(v_i) = \sum_{j=0}^{J_{PLIM}} P_{PLIM}(v_j) + \sum_{j=0}^{J_{SW}} P_{SW}(v_j) + \sum_{j=0}^{J_{MSC}} P_{MSC}(v_j), \quad (6)$$

де  $P_{PLIM}(v_j)$  – енергоспоживання інтерфейсних модулів і портових адаптерів PLIM (Physical Layer Interface Module),  $P_{SW}(v_m)$  – комутаційних фабрик SW (Switch Fabric),  $P_{MSC}(v_k)$  – модулів управління MSC (Modular Services Card) відповідно.

Отже, функція, яка визначає енергоспоживання пристрою мережевого рівня, має вигляд

$$P_{max}(v) = P_{Chas}(v) + \sum_{u=0}^{U_{Proc}} P_{Proc}(v_u) + \sum_{j=0}^{J_{PLIM}} P_{PLIM}(v_j) + \sum_{j=0}^{J_{SW}} P_{SW}(v_j) + \sum_{j=0}^{J_{MSC}} P_{MSC}(v_j). \quad (7)$$

Збільшення швидкості передачі вимагає більш продуктивних і швидкодіючих елементів. У разі збільшення швидкості передачі відбувається досить суттєве збільшення енергоспоживання контролера і лінійних карт маршрутизатора.

Для оптичного домену потужність, яка витрачається задля обробки одного блоку даних, визначається за формулою

$$P = P_{equip.op}(t) \cdot \frac{L_{block}}{V}, \quad (8)$$

де  $P_{equip.op}(t)$  – витрати пристроєм каналного рівня за одиницю часу,  $V$  – швидкість передачі оптичного сигналу в мережі (в бітах за секунду).

На рис. 3 показано структуру акустооптичного комутатора, згідно з якої наведено формули розрахунку енергоспоживання.

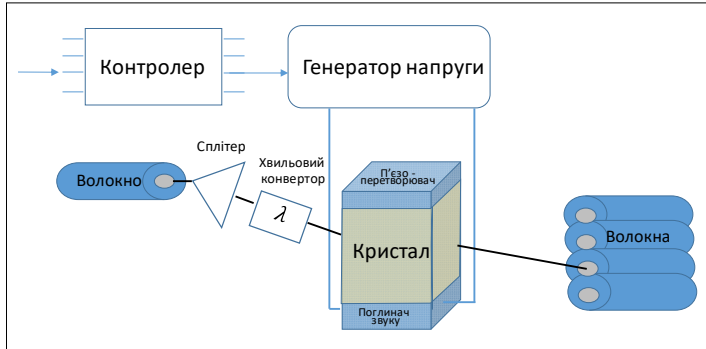


Рис. 3

Енергетичне споживання запропонованої архітектури пристрою визначається за формулою

$$P_{equip.switch}(v) = P_{proc}(v) + P_{genV}(v) + P_{wave}(v) + P_{cool}(v), \quad (9)$$

де  $P_{proc}(v)$  – енергоспоживання контролера,  $P_{genV}(v)$  – генератора напруги,  $P_{wave}(v)$  – електроенергія, яка витрачається на хвильову конвертацію,  $P_{cool}(v)$  – електроенергія на охолодження комутатора

$$P_{cool}(v) = k_e \cdot (P_{proc}(v) + P_{genV}(v) + P_{wave}(v)). \quad (10)$$

У [20] зазначено, що у разі споживанні комутатором 1 Вт електроенергії витрачається до 1 Вт електроенергії на його охолодження. Приймаємо параметр  $k_e$  в межах  $0,5 \leq k_e \leq 1$ , який визначає частку електроенергії, що припадає на охолодження від сумарного енергоспоживання комутатора.

Енергоспоживання генератора напруги  $P_{genV}(v)$  визначається наступним чином:

$$P_{genV}(v) = \int I \cdot U_{manag}(t) dt, \quad (11)$$

де  $U_{manag}$  – керуюча напруга, що подається на комутатор. Для акустооптичного комутатора вона змінюється у діапазоні  $0 < U_{manag} < U_{acous}$ . Максимально допустима керуюча напруга генератора  $U_{acous}$ , необхідна задля забезпечення режиму Брега, визначається формулою

$$U_{acous} = \frac{\tilde{\lambda}}{\pi \cdot f_p \cdot d_{ij} \cdot Q_m} \cdot \sqrt{\frac{\eta \cdot H_n}{M_2 \cdot L_a \cdot 3,2 \cdot b_a \cdot l_a \cdot Z_{36}}}, \quad (12)$$

де  $b_a$  і  $l_a$  – ширина і довжина звукового стовпа,  $Z_{36}$  – акустичний опір матеріалу звукопроводу,  $f_p$  – резонансна частота п'єзоперетворювача,  $d_{ij}$  – п'єзомодуль матеріалу п'єзоперетворювача,  $Q_m$  – механічна добротність п'єзоперетворювача,  $L_a$  – довжина акустооптичної взаємодії,  $M_2$  – коефіцієнт АО,  $H_n$  – ширина п'єзоперетворювача

На наступному етапі за методикою визначається енергетичне споживання граничних і проміжних вузлів. На граничних вузлах процес обробки інформації здійснюється в одному напрямку, відповідно енергетичне споживання визначається на вхідному  $P_{Edge_{input}}$  та вихідному вузлах  $P_{Edge_{output}}$  за формулами

$$P_{Edge_{input}} = P_{IP} + P_{tr.l} + P_{modulator_{DWDM}}, \quad (13)$$

$$P_{Edge_{output}} = P_{IP} + P_{tr.l} + P_{receiver_{DWDM}}, \quad (14)$$

де  $P_{modulator_{DWDM}}$ ,  $P_{receiver_{DWDM}}$  – витрати електрооптичного модулятора та фотоприймача відповідно.

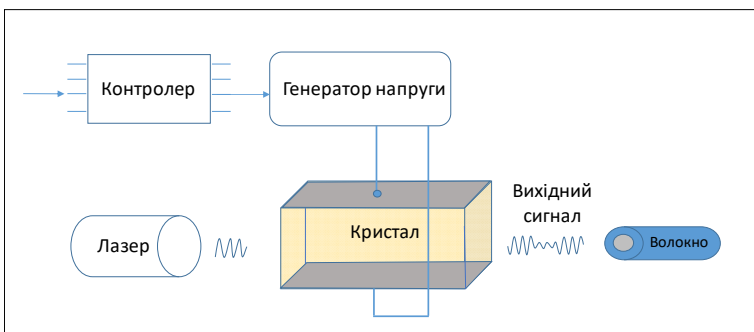


Рис. 4

Виходячи із структури електрооптичного модулятора (рис. 4), його енергоспоживання становитиме

$$P_{modulator_{DWDM}}(v) = P_{proc}(v) + P_{genV_m}(v) + P_{cool}(v), \quad (15)$$

де  $P_{proc}(v)$ ,  $P_{genV}(v)$  – енергоспоживання контролера та електричного сигналу відповідно,  $P_{cool}(v)$  – електроенергія, яка витрачається на охолодження модулятора

$$P_{cool}(v) = k_e \cdot (P_{proc}(v) + P_{genV_m}(v)). \quad (16)$$

З врахуванням (16) формула (15) має вигляд

$$P_{modulator_{DWDM}}(v) = (k_e + 1) \cdot (P_{proc}(v) + P_{genV_m}(v)). \quad (17)$$

Миттєве енергоспоживання генератора  $P_{genV}(v)$  дорівнює добутку миттєвих значень напруги і струму. Керуюча напруга має максимальне значення  $U_{manag}(t)$  для симетричної структури електрооптичного модулятора. Загальне енергетичне споживання генератора для структури електрооптичного модулятора напруги визначається наступною формулою:

$$P_{genV_m}(v) = \int I \cdot U_{manag}(t) dt, \quad (18)$$

де  $0 < U_{manag} < U_{N/2}$ .

Для проміжних вузлів визначення параметру енергоспоживання залежить від типу комутації на DWDM рівні, а також режиму передачі даних. Якщо такий вузол використовує електричну матрицю комутації на DWDM рівні, то зазвичай це також передбачає передачу всіх даних на верхні рівні для її обробки. У такому випадку споживання проміжного вузла з проміжним оптоелектронним перетворенням становить

$$P_E = P_{IP} + 2 \cdot P_{tr.l.} + P_{receiver_{DWDM}} + P_{modulator_{DWDM}}. \quad (19)$$

З формули (19) випливає

$$P_{\sum_{DWDM}} = \sum_{i=1}^{n+1} (P_{modulator_{DWDM_i}} + P_{receiver_{DWDM_i}}) + P_{\sum_{equip.}}, \quad (20)$$

де  $n$  – кількість транзитних вузлів,  $P_{\sum_{equip.}}$  – енергоспоживання, яке витрачається на підсилювачі, ізолятори, конвертори та інші пристрої, що використовуються в мережі, без врахування енергоспоживання модуляторів та приймачів.

Відсутність проміжного оптоелектронного перетворення на таких вузлах свідчить про використання оптичної матриці комутації на DWDM рівні. Так, наприклад, для повністю оптичних мереж це вимагає відкриття наскрізних каналів між вузлом ініціатором з'єднання і вузлом одержувачем. Відповідно інформаційні блоки даних не виходять із оптичного домену. Відкриття такого каналу вимагає резервування часових і спектральних ресурсів мережі. Задля його відкриття відсилається певна кількість службових блоків даних ( $N_{signal}$ ), для обробки яких витрачається потужність  $P_{transp}$ , що враховується у визначенні параметру енергоспоживання (формула (3)). Дані блоки резервують спектральні та частотні ресурси мережі. Відповідно витрачена енергія на вузлі без оптоелектронного перетворення становитиме

$$P_O = P_{sw} + P_{equip.}, \quad P_{transp} = N_{sign.} \cdot P_E, \quad (21,22)$$

де  $P_{sw}$  – енергія, витрачена оптичним комутатором,  $P_{equip.}$  – на обладнання, зокрема атенюатори, фільтри та інші пристрої, крім комутаторів та пристроїв, які пов'язані з ним відповідно.

Як описано вище, споживання повністю оптичних комутаторів визначається споживанням оптичної матриці комутації, використанням хвильових конвекторів і оптичних підсилювачів. Відповідно, споживання таких пристроїв визначається

$$P_{sw} = (P_s + P_{wc} + P_{OA}) \cdot \frac{L_{block}}{V}, \quad (23)$$

де  $P_s$  – витрати електроенергії оптичним комутатором,  $P_{wc}$  – оптичним хвильовим конвертором за зміни довжини хвилі,  $P_{OA}$  – оптичним підсилювачем відповідно,  $V$  – швидкість передачі.

Енергетичне споживання регенераційного обладнання базується на використанні оптичних підсилювачів, а також і 3R регенераторів. Звідси визначаємо витрати електроенергії на один блок даних

$$P_{ROE} = \frac{L_{block}}{V} \cdot (Q \cdot P_{OA} + T \cdot P_{3R}), \quad (24)$$

де  $Q$  – кількість використаних оптичних підсилювачів та  $T$  – кількість 3R регенераторів від пункту А до пункту Б,  $P_{OA}$  – витрати оптичним підсилювачем за одиницю часу,  $P_{3R}$  – витрати електричним регенератором.

Задля визначення сумарного енергоспоживання інфокомунікаційної мережі необхідно розрахувати керуючу напругу для електрооптичного модулятора і акустооптичного комутатора. Керуюча напруга вибирається в межах від  $0 < U_{manag} < U_{\lambda/2}$ . Для електрооптичних матеріалів вона визначається півхвильовою напругою, при якій досягається зміна коефіцієнта пропускання [19],

$$U_{\lambda/2} = \frac{\lambda \cdot d}{2 \cdot n^3 \cdot r_{ij} \cdot L}, \quad (25)$$

де  $\lambda$  – довжина хвилі,  $d$  – товщина зразка,  $n$  – показник заломлення,  $r_{ij}$  – електрооптичний коефіцієнт,  $L$  – довжина кристала.

Як видно із формули (25), за більшого значення електрооптичного коефіцієнту необхідна менша напруга для досягнення потрібної зміни коефіцієнта пропускання. Вихідними даними у розрахунку є  $d=13,4$  мм,  $L=18,5$  мм. Так за  $r_{ij}=3,4 \cdot 10^{-12}$  м/В параметр півхвильової напруги  $U_{\lambda/2} = 5588$  В [16]. Визначений у роботі [21] електрооптичний коефіцієнт кристалу ніобіту літія  $r_{ij}=39,7 \cdot 10^{-12}$  м/В у разі  $d=13,4$  мм,  $L=18,5$  мм,  $\theta = 43^\circ$  дав змогу отримати  $U_{\lambda/2} = 510,9$  В, що на 90,8% менше від попереднього. Це суттєво зменшує енергоспоживання такого пристрою.

Для акустооптичних пристроїв параметром, що визначає енергоспоживання, є  $\eta$ , який також визначає коефіцієнт передачі [23]

$$\eta = \frac{\pi^2}{2 \cdot \lambda^2} \cdot M_2 \cdot \frac{L}{H} \cdot P_a, \quad (26)$$

де  $M_2$  – параметр акустооптичної якості,  $L$  – довжина акустичної взаємодії,  $H$  – висота ультразвукового п'єзоперетворювача,  $P_a$  – акустична потужність, яка визначається таким чином [24]

$$P_a = 6.4 \cdot b \cdot l \cdot Z_{se} \cdot f_p^2 \cdot d_{ij}^2 \cdot Q_m^2 \cdot U^2, \quad (27)$$

З формул (26) і (27) легко бачити, що за більшого значення параметру акустооптичної якості  $M_2$  необхідна менша акустична потужність і, відповідно, менша керуюча напруга задля досягнення необхідного рівня коефіцієнта передачі пристрою. Значення керуючої напруги акустооптичного комутатора визначається за формулою (12).

**Висновки.** Визначено критерії, що впливають на енергоспоживання таких мереж з точки зору архітектурних і технологічних підходів, а саме кількість та структура задіяних вузлів, архітектура мережі, вид транспортної технології, розмір блоку даних, тип використовуваного обладнання, кількість проміжних оптоелектронних перетворень, тип комутації, використання хвильових конверторів, кількість та вид регенераційних пунктів, кількість хвиль WDM систем. На основі цих критеріїв розроблено універсальну методіку визначення комплексного параметру енергоспоживання інфокомунікаційних мереж. Використання даної методіки на практиці дасть змогу розрахувати енергоспоживання інфокомунікаційної мережі на етапі проектування з метою вибору оптимальних параметрів щодо побудови енергоефективної мережі із забезпеченням необхідної продуктивності, економічної ефективності та якості обслуговування користувачів.

Згідно з цією методикою об'єктом дослідження може бути будь яка інфокомунікаційна мережа. Перспективою подальших досліджень є розроблення програмного забезпечення задля автоматизації запропонованої методіки розрахунку енергоспоживання з можливістю моделювання різних топологічних архітектур сучасних інформаційно-комунікаційних мереж.

1. Grandelag P. Energy-efficient cooling for telecom networks: Thermosiphon as energy savings generator. *IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC)*. Osaka, 2015. Pp. 1-3.

2. Kahalo I., Beshley H., Beshley M., Panchenko O. Enhancing QoS and Energy Efficiency of LTE/LTE-U/Wi-Fi Integrated Network Based on Adaptive Technique for Radio Structure Formation. *IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*. Lviv, Ukraine, 2019. Pp. 1167-1170.

3. Elmighani J. M. H., Klein T., Hinton K., Nonde L, Lawey A. Q., El-Gorashi T. E. H., Musa M. O. I., X. Don . GreenTouch GreenMeter core network energy-efficiency improvement measures and optimization. In *IEEE/OSA*

*Journal of Optical Communications and Networking*. 2018. Vol. 10. No 2. Pp. A250-A269.  
DOI: <https://doi.org/10.1364/JOCN.10.00A250>

4. Hadi M., Pakravan M. R. Energy-efficient fast configuration of flexible transponders and grooming switches in OFDM-based elastic optical networks. in *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*. 2018. Vol. 10. No 2. Pp. 90-103. DOI: <https://doi.org/10.1364/JOCN.10.000090>
5. Musa M., Elgorashi T., Elmoghani J. Bounds for energy-efficient survivable IP over WDM networks with network coding. in *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*. 2018. Vol. 10. No 5. Pp. 471-481. DOI: <https://doi.org/10.1364/JOCN.10.000471>
6. Klymash M., Beshley H., Seliuchenko M., Beshley M. Algorithm for clusterization, aggregation and prioritization of M2M devices in heterogeneous 4G/5G network. 4th International Scientific-Practical Conference *Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T)*. Kharkiv, Ukraine, 2017. Pp. 182-186.
7. Romanchuk V., Beshley M., Panchenko O., Arthur P. Design of software router with a modular structure and automatic deployment at virtual nodes. 2nd International Conference on *Advanced Information and Communication Technologies (AICT)*. Lviv, Ukraine, 2017. Pp. 295-298.
8. Zong Y., Ou Y., Hammad A., Kondepu K., Nejabati R., Simeonidou D., Liu Y., Guo L. Location-aware energy efficient virtual network embedding in software-defined optical data center networks. in *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*. 2018. Vol. 10. No 7. Pp. 58-70. DOI: <https://doi.org/10.1364/JOCN.10.000B58>
9. Yeromenko V., Kochan O. The conditional least squares method for thermocouples error modeling. IEEE 7th International Conference on *Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS)*. Berlin, Germany, 2013. Pp. 157-162. DOI: <https://doi.org/10.1109/IDAACS.2013.6662661>
10. Memon A. K., Khan A. M., Musavi S. H. A., Kumar G., Memon A. L. 40Gbps DQPSK transmission system for high data rate energy efficient Next Generation Passive Optical Network (NGPON). International Conference on *Innovations in Electrical Engineering and Computational Technologies (ICIEECT)*. Karachi, Pakistan, 2017. Pp. 1-8.
11. Musumeci F., Hmaity A., Tornatore M., Pattavina A. Energy efficiency in reliable optical core networks. IEEE Online Conference on *Green Communications (OnlineGreenComm)*. Piscataway, USA, 2015. Pp. 1-6.
12. Su J., Kochan O. Common mode noise rejection in measuring channels. *Instruments and Experimental Techniques*. 2015, Vol. 58. No 1. Pp. 86-89.
13. Ji Y., Zhang J.; Zhao Y., Li H., Yang Q., Ge C. Xiong Q., Xue D., Yu J., Qiu S. All Optical Switching Networks With Energy-Efficient Technologies From Components Level to Network Level. in *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2014. Vol. 32. No 8. Pp. 1600-1614. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSAC.2014.2335352>
14. Tucker R., Hinton K., Ayre R. Energy efficiency in cloud computing and optical networking. 38th European Conference and Exhibition on *Optical Communications*. Amsterdam, Holland, 2012. Pp. 1-32.
15. Musumeci F., Vismara F., Grkovic V., Tornatore M., Pattavina A. On the Energy Efficiency of Optical Transport with Time Driven Switching. IEEE international Conference on *Communication*. Kyoto, Japan, 2011. Pp. 1-5.
16. Kaidan M., Andrushchak V., Pitsyk M. Calculation Model of Energy Efficiency in Optical Transport Networks. Second International Scientific-Practical Conference *Problems of Infocommunications Science and Technology*. Kharkiv, 2015. Pp. 167-170.
17. Тесик Ю. Ф., Карасинский О. Л., Мороз Р. Н. Комп'ютерне моделювання високовольтного цифро-аналогового перетворювача. *Технічна електродинаміка*. 2019. № 1. С. 85-88.  
DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.01.085>
18. Герцик С. М., Городжа А. Д., Мислович М. В., Подольцев О. Д., Сисак Р. М., Трошинський Б. О. Моделі хвильових процесів в об'єктах кінцевих розмірів та їхнє використання для діагностики електротехнічного обладнання. *Технічна електродинаміка*. 2018. № 2. С. 86-94.  
DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.02.086>
19. Chabarek J., Sommers J., Barford P., Eitan C., Tsang D., Wright S. Power Awareness in Network Design and Routing. The 27th Conference on *Computer Communications*. Phoenix, 2008. Pp. 457-465.
20. Nhat V. V. M., Quoc N. H. A model of adaptive grouping scheduling in OBS core nodes. *Journal of Convergence*. 2014. Vol. 5. No 1. Pp. 9-13.
21. Лопатина П.С., Криштоп В.В. Электрооптический модулятор для волоконно-оптических линий связи. *Изв.Вузov.Приборостроение*. 2009. Т. 52. № 12. С. 67-71.
22. Andrushchak A.S., Mytsyk B.G., Demyanyshyn N.M., Kaidan M.V., Yurkevych O.V., Dumych S.S., Kityk A.V., Schranz W. Spatial anisotropy of linear electro-optic effect in crystal materials: II. Indicative surfaces as efficient tool for electro-optic coupling optimization in LiNbO3. *Optics & Lasers in Engineering*. 2009. Vol. 47. No 1. Pp.24-30.
23. Феделеш В.І., Стегура М.М., Юркін І.М., Бабидорич П.П. Акустооптичні модулятори і дефлектори на основі халькогенідних стекол(As<sub>2</sub>S<sub>3</sub>)<sub>1-x</sub>Hg(Ge)<sub>x</sub>. *Науковий вісник Ужгородського університету. Серія Фізика*. Ужгород, 2009. № 26. С. 157-166.
24. Бондаренко В.С., Зоренко В.П., Чкалова В.В. Акустооптические модуляторы света. Москва. Радио и связь. 1988. 136 с.



## МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ В ИНФОРМАЦИОННО-КОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

Сонг Венгуанг<sup>1</sup>, Андрушак В.С.<sup>2</sup>, Кайдан Н.В.<sup>2</sup>, Бешлей Н.И.<sup>2</sup>, Кочан О.В.<sup>1,2</sup>, Су Цзюнь<sup>3</sup>

<sup>1</sup> School of Computer Science, Yangtze University,  
Jingzhou, 434023, China, e-mail: [wenguang\\_song@yangtzeu.edu.cn](mailto:wenguang_song@yangtzeu.edu.cn).

<sup>2</sup> Национальный университет "Львовская политехника",  
ул. Степана Бандеры, 12, Львов, 79013, Украина,  
e-mail: [mykola.i.beshlei@lpnu.ua](mailto:mykola.i.beshlei@lpnu.ua); [orestvk@gmail.com](mailto:orestvk@gmail.com)

<sup>3</sup> School of Computer Science, Hubei University of Technology,  
Wuhan, China.

*Предложена методика определения комплексного параметра энергопотребления для инфокоммуникационных сетей. В отличие от известных предложенная методика учитывает гетерогенность и многослойность сети, а также параметр мощности, расходуемой во время простоя сетевого оборудования в процессе обработки служебных блоков данных, что является достаточно важной задачей для повышения точности определения энергопотребления на этапе внедрения энергоэффективной сети. Согласно данной методике расчет параметра энергопотребления можно проводить для любой архитектуры инфокоммуникационной сети, конфигурации сетевых устройств и для оборудования от различных производителей. Библ. 24, рис. 4.*

**Ключевые слова:** энергопотребление, информационно коммуникационная сеть, DWDM, электрооптика, акустооптика, коммутатор, модулятор.

## METHODOLOGY FOR CALCULATING THE ENERGY CONSUMPTION OF INFORMATION COMMUNICATION SYSTEMS

Song Wenguang<sup>1</sup>, Andrushchak V.S.<sup>2</sup>, Kaidan M.V.<sup>2</sup>, Beshley M.I.<sup>2</sup>, Kochan O.V.<sup>1,2</sup>, Su Jun<sup>3</sup>

<sup>1</sup> School of Computer Science, Yangtze University,  
Jingzhou, 434023, China, e-mail: [wenguang\\_song@yangtzeu.edu.cn](mailto:wenguang_song@yangtzeu.edu.cn).

<sup>2</sup> Lviv Polytechnic National University,  
Str. Stepana Bandera, 12, Lviv, 79013, Ukraine, e-mail: [mykola.i.beshlei@lpnu.ua](mailto:mykola.i.beshlei@lpnu.ua); [orestvk@gmail.com](mailto:orestvk@gmail.com)

<sup>3</sup> School of Computer Science, Hubei University of Technology,  
Wuhan, China.

*The methodology for calculating the complex parameter of energy consumption for info-communication networks is proposed. Unlike the known methodologies, the proposed technique takes into account heterogeneity and multilayered network. It also takes into account the parameter of power consumption during the downtime of network equipment in the process of processing of service data blocks, which is quite an important task to improve the accuracy of energy consumption at the stage of implementing an energy-efficient network. According to this method, the energy consumption can be calculated for any network architecture and configuration, network devices configuration and equipment from different manufacturers. References 24, figures 4.*

**Keywords:** power consumption, info-communication network, DWDM, electrooptics, acoustics, switch, modulator.

1. Grandelag P. Energy-efficient cooling for telecom networks: Thermosiphon as energy savings generator. *IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC)*. Osaka, 2015. Pp. 1-3.

2. Kahalo I., Beshley H., Beshley M., Panchenko O. Enhancing QoS and Energy Efficiency of LTE/LTE-U/Wi-Fi Integrated Network Based on Adaptive Technique for Radio Structure Formation. *IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*. Lviv, Ukraine, 2019. Pp. 1167-1170.

3. Elmirghani J. M. H., Klein T., Hinton K., Nonde L., Lawey A. Q., El-Gorashi T. E. H., Musa M. O. I., X. Don . GreenTouch GreenMeter core network energy-efficiency improvement measures and optimization. In *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*. 2018. Vol. 10. No 2. Pp. A250-A269.  
DOI: <https://doi.org/10.1364/JOCN.10.00A250>

4. Hadi M., Pakravan M. R. Energy-efficient fast configuration of flexible transponders and grooming switches in OFDM-based elastic optical networks. in *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*. 2018. Vol. 10. No 2. Pp. 90-103. DOI: <https://doi.org/10.1364/JOCN.10.000090>

5. Musa M., Elgorashi T., Elmirghani J. Bounds for energy-efficient survivable IP over WDM networks with network codin. in *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*. 2018. Vol. 10. No 5. Pp. 471-481.  
DOI: <https://doi.org/10.1364/JOCN.10.000471>

6. Klymash M., Beshley H., Seliuchenko M., Beshley M. Algorithm for clusterization, aggregation and prioritization of M2M devices in heterogeneous 4G/5G network. 4th International Scientific-Practical Conference

*Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T)*. Kharkiv, Ukraine, 2017. Pp. 182-186.

7. Romanchuk V., Beshley M., Panchenko O., Arthur P. Design of software router with a modular structure and automatic deployment at virtual nodes. 2nd International Conference on *Advanced Information and Communication Technologies (AICT)*. Lviv, Ukraine, 2017. Pp. 295-298.

8. Zong Y., Ou Y., Hammad A., Kondepu K., Nejabati R., Simeonidou D., Liu Y., Guo L. Location-aware energy efficient virtual network embedding in software-defined optical data center networks. in *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*. 2018. Vol. 10. No 7. Pp. 58-70. DOI: <https://doi.org/10.1364/JOCN.10.000B58>

9. Yeromenko V., Kochan O. The conditional least squares method for thermocouples error modeling. IEEE 7th International Conference on *Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS)*. Berlin, Germany, 2013. Pp. 157-162. DOI: <https://doi.org/10.1109/IDAACS.2013.6662661> .

10. Memon A. K., Khan A. M., Musavi S. H. A., Kumar G., Memon A. L. 40Gbps DQPSK transmission system for high data rate energy efficient Next Generation Passive Optical Network (NGPON). International Conference on *Innovations in Electrical Engineering and Computational Technologies (ICIEECT)*. Karachi, Pakistan, 2017. Pp. 1-8.

11. Musumeci F., Hmaity A., Tornatore M., Pattavina A. Energy efficiency in reliable optical core networks. IEEE Online Conference on *Green Communications (OnlineGreenComm)*. Piscataway, USA, 2015. Pp. 1-6.

12. Su J., Kochan O. Common mode noise rejection in measuring channels. *Instruments and Experimental Techniques*. 2015, Vol. 58. No 1. Pp. 86-89.

13. Ji Y., Zhang J.; Zhao Y., Li H., Yang Q., Ge C.Xiong Q., Xue D., Yu J., Qiu S. All Optical Switching Networks With Energy-Efficient Technologies From Components Level to Network Level. in *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2014. Vol. 32. No 8. Pp. 1600-1614. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSAC.2014.2335352>

14. Tucker R., Hinton K., Ayre R. Energy efficiency in cloud computing and optical networking. 38th European Conference and Exhibition on *Optical Communications*. Amsterdam, Holland, 2012. Pp. 1-32.

15. Musumeci F., Vismara F., Grkovic V., Tornatore M., Pattavina A. On the Energy Efficiency of Optical Transport with Time Driven Switching. IEEE international Conference on *Communication*. Kyoto, Japan, 2011. Pp. 1-5.

16. Kaidan M., Andrushchak V., Pitsyk M. Calculation Model of Energy Efficiency in Optical Transport Networks. Second International Scientific-Practical Conference *Problems of Infocommunications Science and Technology*. Kharkiv, 2015. Pp. 167-170.

17. Tesik Yu.F., Karasinskii O.L., Moroz R.N. Computer simulation of high-voltage DAC. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2019. No 1. Pp. 85-88. (Ukr). DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.01.085>

18. Hertsyk S.M., Gorodzha A.D., Myslovykh M.V., Podoltsev O.D., Sysak R.M., Troshchynskyi B.O. Models of wave processes in objects of limited form and their use for diagnostics of electrotechnical equipment. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2018. No 2. Pp. 86-94. (Ukr). DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.02.086>

19. Chabarek J., Sommers J., Barford P., Eitan C., Tsiang D., Wright S. Power Awareness in Network Design and Routing. The 27th Conference on *Computer Communications*. Phoenix, 2008. Pp. 457-465.

20. Nhat V. V. M., Quoc N. H. A model of adaptive grouping scheduling in OBS core nodes. *Journal of Convergence*. 2014. Vol. 5. No 1. Pp. 9-13.

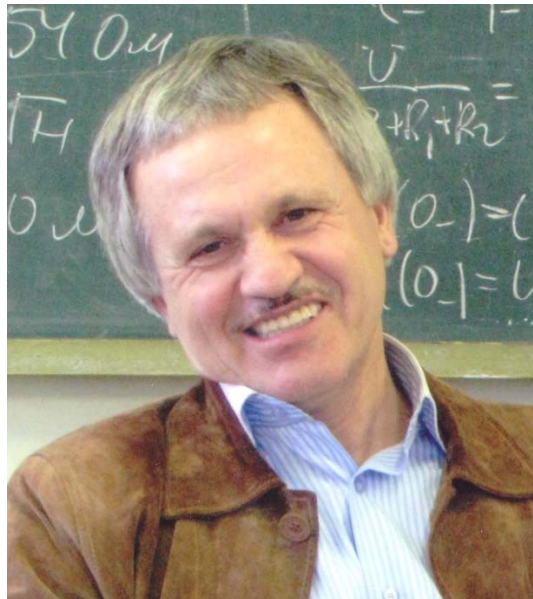
21. Lopatina P.S., Krishtop V.V. Electro-optical modulator for fiber-optic communication lines. *Izvestiia VUZov. Priborostroenie*. 2009. Vol. 52. No 12. Pp. 67-71. (Rus).

22. Andrushchak A.S., Mytsyk B.G., Demyanyshyn N.M., Kaidan M.V., Yurkevych O.V., Dumych S.S., Kityk A.V., Schranz W. Spatial anisotropy of linear electro-optic effect in crystal materials: II. Indicative surfaces as efficient tool for electro-optic coupling optimization in LiNbO<sub>3</sub>. *Optics & Lasers in Engineering*. 2009. Vo. 47. No 1. Pp.24-30.

23. Fedelesh V.I., Stegura M.M., Yurkin I.M., Babidorich P.P. Acousto-optical modulators and deflectors based on the chalcogenide glasses (As<sub>2</sub>S<sub>3</sub>)<sub>1-x</sub>Hg(Ge)<sub>x</sub>. *Naukovyi visnyk Uzhhorodskoho universytetu. Seriya Pfizika*. 2009. No 26. Pp. 157-166. (Ukr).

24. Bondarenko V.S., Zorenko V.P., Chkalova V.V. Acousto-optical light modulators. Moskva: Radio i sviaz, 1988. 136 p. (Rus)

Надійшла 05.12.2019  
Остаточний варіант 29.04.2020

ДО 70-РІЧЧЯ ЧЛЕНА-КОРЕСПОНДЕНТА НАЦІОНАЛЬНОЇ АКАДЕМІЇ НАУК УКРАЇНИ  
ЩЕРБИ АНАТОЛІЯ АНДРІЙОВИЧА

Завідувач відділу електроживлення технологічних систем Інституту електродинаміки НАН України, доктор технічних наук, професор, член-кореспондент НАН України, професор кафедри теоретичної електротехніки КПІ ім. Ігоря Сікорського Щерба А.А. народився 3 липня 1950 р. У 1972 р. закінчив Київський національний університет ім. Т.Г. Шевченка за фахом радіофізик (спеціалізація: квантова електроніка). Після закінчення ВУЗу за направленням працював інженером у НДІ "Квант", м. Київ (1972–1975 рр.). У 1975 р. вступив до очної аспірантури Інституту електродинаміки НАН України (до наукового керівника члена-кореспондента НАН України О.М. Міляха). Після закінчення аспірантури був направлений в Інститут електродинаміки НАН України, де пройшов науковий шлях від молодшого наукового співробітника до завідувача відділу електроживлення технологічних систем.

Дисертацію на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук А.А. Щерба захистив у 1984 р., у 1989 р. йому присвоєно звання старшого наукового співробітника, докторську дисертацію за спеціальністю 05.09.03 "Електротехнічні комплекси та системи" захистив у 1993 р., у 2003 р. його обрано членом-кореспондентом НАН України, а в 2005 році присвоєно звання професора за спеціальністю 05.09.03 "Електротехнічні комплекси та системи".

Щерба Анатолій Андрійович є відомим вченим, який створив потужну наукову школу з електродинаміки та електрофізики взаємодії сильних електричних полів розрядно-імпульсних струмів у гетерогенних середовищах високовольтного електроенергетичного та електротехнологічного обладнання. Його дослідження та наукове обґрунтування нових особливостей і закономірностей локального підсилення електричних полів та інтенсивності електрофізичних процесів руйнації реальної полімерної ізоляції забезпечили розробку ним ос-

нов теорії підвищення надійності та ресурсу сучасних високовольтних кабелів енергетичного призначення і полімерних ізоляторів повітряних ліній електропередавання.

Визначення Щербою А.А. електроенергетичних, динамічних та електрофізичних закономірностей формування в провідних гетерогенних середовищах багатоканальних імпульсних струмів зі швидкою просторовою міграцією окремих електроіскрінь дали змогу розробити нові методи підвищення в десятки-сотні разів продуктивності промислових електроерозійних технологій з виробництва іскроерозійних мікро- та наноструктурних порошків з унікальними експлуатаційними властивостями.

Наукові результати Щерби А.А. опубліковано в 475 працях, з них – 10 монографій.

У 1998 р. А.А. Щербу у складі авторського колективу Інституту електродинаміки НАН України та НДІ високих напруг (м. Слов'янськ) нагороджено Державною премією України в галузі науки і техніки за роботу "Розроблення науково-технічних основ, організацію серійного виробництва та впровадження на лініях електропередачі 10–1150 кВ високовольтних ізолюючих конструкцій зі склопластика та силіконових еластомерів".

В останні десятиріччя Щерба А.А. та колектив відділу, яким він керує, у творчій співпраці зі співробітниками НТУ України «КПІ ім. Ігоря Сікорського», НТУ "Харківський політехнічний інститут" та заводу "Південкабель" (м. Харків) удосконалює основи теорії та технології підвищення електротермічної стійкості структурно-модифікованої полімерної ізоляції, надійності та ресурсу сучасних високовольтних кабелів енергетичного призначення. Високий рівень наукових результатів у цьому науковому напрямку та його важливість підтверджено отриманням співробітниками відділу Щерби А.А. ще двох Державних премій в галузі науки:

– 2007 р. – за роботу "Розробка та впровадження в серійне виробництво вітчизняної високовольтної кабельно-провідникової продукції на напругу до 110 кВ, що забезпечує підвищення надійності та безпеки систем електропостачання";

– 2018 р. – за роботу "Розробка та створення електротехнологічного комплексу виробництва кабельних систем надвисоких напруг".

Ще 2 премії Президента України для молодих вчених отримано учнями Щерби А.А. у 2009 і 2014 рр., що підкреслює важливість трудової діяльності А.А. Щерби, пов'язану з викладацькою і науковою роботою на кафедрі теоретичної електротехніки НТУ України "КПІ ім. Ігоря Сікорського", де він працює з 2003 року.

Як професор кафедри теоретичної електротехніки НТУ України "КПІ ім. Ігоря Сікорського" та професор Відділення цільової підготовки ІЕД НАН України А.А. Щерба багато зусиль приділяє підготовці молодих фахівців-електротехніків. Він підготував 10 докторів і 18 кандидатів технічних наук.

Наукові досягнення А. Щерби відзначено також премією НАН України ім. В.М. Хрущова (2010 р.) та Почесними грамотами Верховної Ради України (2009 р.) і Міністерства освіти і науки України (2008 р.).

*Друзі, колеги, редакція журналу "Технічна електродинаміка" та численні учні щиро вітають Анатолія Андрійовича з ювілеєм, зичать йому доброго здоров'я, творчої наснаги, нових ідей та наукових досягнень.*

## ДО 85-РІЧЧЯ БАРСЬКОГО ВІКТОРА ОЛЕКСІЙОВИЧА



17 червня 2020 р виповнюється 85 років від дня народження відомого фахівця в галузі електроприводу та перетворювальної техніки доктора технічних наук, професора Віктора Олексійовича Барського.

Випускник Харківського політехнічного інституту, Віктор Олексійович за 63 роки роботи пройшов великий шлях від інженера Харківського електромеханічного заводу до головного конструктора – Голови правління Міжнародного консорціуму «Енергозбереження», зробивши значний внесок в дослідження, створення і виробництво нових видів електроустаткування протягом 4-х етапів розвитку електромеханічних систем: з контактними, електромашинними, тиристорними і транзисторними перетворювачами. В 1969 році В.О. Барський успішно захистив кандидатську дисертацію, присвячену оптимальним системам керування потужними електроприводами, а в 1989 році на засіданні спеціалізованої вченої ради при Інституті електродинаміки НАН України – докторську дисертацію, у якій виклав результати досліджень реверсивних тиристорних перетворювачів з роздільним керуванням та граничною швидкодією.

Дослідження та інженерні розробки В.А. Барського та його учнів і співробітників серйозно вплинули на розвиток силової електроніки і електроприводу у нашій країні.

В.А. Барський був одним з ініціаторів і керівників створення в період 1963-1980 рр. ряду тиристорних збудників і перетворювачів потужністю до 350 кВт, а потім серій потужністю до 12000 кВт, на основі яких були переоснащені електроприводи в чорній і кольоровій металургії, гірничо-шахтній промисловості та ін.

В.О. Барського відрізняє різноманіття наукових і інженерних інтересів. Високої оцінки заслуговує внесок, зроблений ним у створення електрообладнання прокатних станів, екскаваторів, шахтних підйомних машин, систем електроживлення дослідних установок ТОКАМАК, електрообладнання для рухомого складу залізничного транспорту та ін.

З ініціативи та під керівництвом В.О. Барського у 1992 році були розроблені перші в СНД перетворювачі частоти на IGBT транзисторах. Серія таких пристроїв і електроприводів на їх основі потужністю до 1000 кВт і більше в наступні роки впроваджувалася на транспорті та інших виробництвах з важкими умовами експлуатації. Для спільних розробок і виробництва таких систем провідними електротехнічними підприємствами України та інших країн у грудні 1995 р. було створено Міжнародний Консорціум «Енергозбереження».

В.О. Барського відрізняє уміння побачити нові тенденції і запропонувати несподівані рішення, що викликають інтерес у фахівців і підтримку його ініціатив співробітниками, партнерами, провідними вченими і керівниками промисловості. Виконані ним глибокі дослідження електромагнітних процесів в реверсивних перетворювальних системах стали базою для проектування і освоєння виробництва серій перетворювачів, здатних конкурувати з кращими світовими зразками.

Зараз в МК «Енергозбереження» під керівництвом В.О. Барського розробляються нові електромеханічні системи на основі електричних машин з масивними роторами, нові електроприводи з вбудованими накопичувачами енергії для транспорту та інших галузей, інше перспективне електрообладнання.

Автор понад 350 наукових праць, винаходів і патентів, член Української Асоціації інженерів-електриків (IEEE – США), член спеціалізованої вченої ради по захисту докторських дисертацій Д.64.050.04 при Національному технічному університеті «Харківський Політехнічний інститут», В.О. Барський користується заслуженою повагою науково-технічної спільноти.

*Колектив ІЕД НАН України, редакція журналу «Технічна електродинаміка», колеги та учні щиро вітають Віктора Олексійовича з ювілеєм і бажають міцного здоров'я, довгих років плідної наукової роботи та нових творчих успіхів!*