



ISSN 1727-9895  
ISSN 2786-7064 (online)

# **Праці**

## **Інституту електродинаміки Національної академії наук України**

**Збірник наукових праць**

**Випуск  
68**

**Київ  
2024**

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

## **ПРАЦІ**

# **Інституту електродинаміки Національної академії наук України**

Збірник наукових праць

Виходить тричі на рік

Засновано у 1999 році

**Випуск  
68**

Київ  
2024

**ПРАЦІ ІНСТИТУТУ ЕЛЕКТРОДИНАМІКИ НАН УКРАЇНИ**

**Редакційна колегія\*:**

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

**Editorial board\*:**

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

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

**International editorial board:**

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

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

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

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

*Друкується за постановою Вченої ради  
Інституту електродинаміки Національної академії наук України.  
Протокол № 9 від 8 серпня 2024 року*

Зареєстровано 07.02.2002. Свідоцтво: серія КВ, № 5843.

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

**Адреса редакції:**

03057, м. Київ, пр. Берестейський, 56, Інститут електродинаміки НАН України.

Тел. (044) 366-26-56 E-mail: [mlyv@ied.org.ua](mailto:mlyv@ied.org.ua); Адреса сайту: <http://prc.ied.org.ua>

ISSN 1727-9895

ISSN 2786-7064 (online)

© Інститут електродинаміки НАН України, 2024

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

**Праці**  
**Інституту електродинаміки**  
**Національної академії наук України**

Випуск 68

2024 р.

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2024.68>

**ЗМІСТ**

**ТЕОРЕТИЧНА ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОФІЗИКА**

*Щерба А.А., Супруновська Н.І.* Регулювання характеристик зарядного кола ємнісного накопичувача енергії зміненням його початкової напруги при аперіодичному заряджанні від джерела постійної напруги .....5

**ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНІ КОМПЛЕКСИ ТА СИСТЕМИ**

*Жаркін А.Ф., Гориславець Ю.М., Глухенький О.І., Білянін Р.В.* Багатошарові індуктори для установки індукційної термообробки алюмінієвих зливків при пресуванні катанки для силових кабелів .....13

**ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ КОМПЛЕКСИ ТА СИСТЕМИ**

*Шамардіна В.М., Земцова К.О.* Математична та комп'ютерна моделі асинхронного двигуна з фазним ротором у режимі динамічного гальмування з самозбудженням .....23

*Жук Д.О., Жук О.К., Козлов М.О.* Удосконалення засобів забезпечення якості електроенергії в суднових ЕЕС з напівпровідниковими пропульсивними комплексами .....29

*Рослік О.А., Скугарев В.А.* Вплив пульсацій імпульсного перетворювача на похибку слідкування за швидкістю бортового електропривода .....37

*Худяєв О.А., Шамардіна В.М., Пиеничников Д.О.* Уточнена модель двоканального електропривода подачі з підсумовуванням рухівна ходовій гайці для високоточних металорізальних верстатів .....43

*Волошко А.В., Шевчук В.В.* Тестування електрообладнання на несприйнятливість до провалів напруги, короткочасних переривань та змін напруги .....50

**ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА РИНКИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ**

*Кириленко О.В., Лобунець Л.Г.* Аналіз статистичних даних результатів завершених робіт в галузі електроенергетики в установах Відділення фізико-технічних проблем енергетики НАН України .....57

*Черкашина В.В., Яковенко О.В.* Аналіз показників якості послуг постачання електричної енергії .....63

*Богомолова О.С., Кравченко Д.В.* Збільшення пропускної спроможності магістральних мереж України.....71

*Кацадзе Т.Л., Буслова Н.В., Новіков К.М., Ніколасва А.Д.* Математичні моделі моніторингу відкладень ожеледі та зміни стріли провисання проводів повітряних ліній електропередавання .....75

**НАПІВПРОВІДНИКОВІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ**

*Чепкунов Р.А.* Перетворювач асинхронного електропривода та електропривода постійного струму .....81

*Вінниченко Д.В.* Характеристики резонансних систем для отримання високої напруги на навантаженні ємнісного типу .....87

*Голубєв В.В., Губаревич В.М., Зозульов В.І., Маруня Ю.В., Сторожук А.І.* Тиристорні перетворювачі зі штучною комутацією.....95

*Федів Є.І., Сівакова О.М.* Складові потужності тиристорного регулятора напруги з активним навантаженням.....100

**ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ ТА АПАРАТИ**

*Кенсицький О.Г., Крамарський В.А., Кобзар К.О.* Щодо відновлення парку турбогенераторів електростанцій України .....106

*Акинін К.П., Кіресєв В.Г., Петухов І.С., Філоменко А.А.* Експериментальні дослідження безконтактних магнітоелектричних тахогенераторів.....114

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2024.68>

## CONTENTS

**THEORETICAL ELECTRICAL ENGINEERING**

*Suprunovska N.I., Shcherba A.A.* Regulation of the charging circuit characteristics of capacitive energy storage by changing its initial voltage during aperiodic charging from a dc voltage source.....5

**ELECTROTECHNOLOGICAL COMPLEXES AND SYSTEMS**

*Zharkin A.F., Goryslavets Yu.M., Gluhenky O.I., Belyanin R.V.* Multilayer inductors for induction heat treatment installation of aluminum castings when pressing rods for power cables .....13

**ELECTROTECHNICAL COMPLEXES AND SYSTEMS**

*Shamardina V.M., Zemtsova K.O.* Mathematical and computer models of an induction motor with a phase rotor in the mode of dynamic braking with self-excitation .....23

*Zhuk D.O., Zhuk O.K., Kozlov M.O.* Improvement of means of ensuring the quality of electrical energy in vessel EES with semiconductor propulsion complexes.....29

*Roslik O.A., Skuhariyev V.A.* Influence of pulsations of the pulse converter on the error of following the speed of the on-board electric drive.....37

*Khudiyayev O.A., Shamardina V.M., Pshenichnikov D.O.* Refined model of two-channel feed electric drive with the summation of movements on the sliding nut for high-precision metal-cutting machines.....43

*Voloshko A.V., Shevchuk V.V.* Testing of electrical equipment for immunity to voltage failures, short-term interruptions and voltage changes.....50

**ELECTRIC POWER SYSTEMS AND ELECTRICITY MARKETS**

*Kyrylenko O.V., Lobunets L.G.* Analysis of statistical data on the results of completed works in the field of electric power in the institutions of the Department of physical and technical problems of energy of the National academy of sciences of Ukraine .....57

*Cherkashina V.V., Yakovenko O.V.* Analysis of service quality indicators supply of electric energy .....63

*Bohomolova O.S., Kravchenko D.V.* Increasing the capacity of Ukraine's transmission networks.....71

*Katsadze T., Buslova N., Novikov K., Nikolaeva A.* Mathematical models for monitoring ice-coating and sagging on overhead transmission power lines.....75

**SEMICONDUCTOR CONVERTERS**

*Chepkunov R.A.* Converter of asynchronous electric drive and dc current electric drive .....81

*Vinnychenko D.V.* Characteristics of resonant systems for obtaining high voltage on a capacitive load .....87

*Golubev V.V., Gubarevich V.M., Zozulev V.I., Маруня Ю.В., Storozhuk A.I.* Thyristor converters with artificial switching.....95

*Fediv E.I., Sivakova O.M.* Component capacities of the thyristor voltage regulator with active load.....100

**ELECTRICAL MACHINES AND APPARATUS**

*Kensitsky O.H., Kramarskyi V.A., Kobzar K.O.* On the restoration of the turbine generator fleet of Ukrainian power plants .....106

*Akinin K.P., Kireyev V.G., Petukhov I.S., Filomenko A.A.* Experimental studies of brushless magnetolectric tachogenerators .....114

Відповідальний секретар С.В. Гаврилук

Редактор Ю.В. Морозова-Леонова

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

## ТЕОРЕТИЧНА ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОФІЗИКА

УДК 621.3.011:621.372

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2024.68.005>

### РЕГУЛЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАРЯДНОГО КОЛА ЄМНІСНОГО НАКОПИЧУВАЧА ЕНЕРГІЇ ЗМІНЕННЯМ ЙОГО ПОЧАТКОВОЇ НАПРУГИ ПРИ АПЕРІОДИЧНОМУ ЗАРЯДЖАННІ ВІД ДЖЕРЕЛА ПОСТІЙНОЇ НАПРУГИ

А.А. Щерба\*, акад. НАН України, Н.І. Супруновська\*\*, докт. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна  
e-mail: [anat.shcherba@gmail.com](mailto:anat.shcherba@gmail.com), [iednat1@gmail.com](mailto:iednat1@gmail.com)

*Проведено аналіз перехідних процесів при аперіодичному заряджанні ємнісного накопичувача енергії (ЄНЕ) електророзрядної установки (ЕРУ) від джерела постійної напруги (ДПН)  $U_{\text{ДПН}}$  за умови змінення початкової напруги на ЄНЕ на момент початку заряду. Отримано залежності енергетичних характеристик (доза енергії, що надходить до ЄНЕ від ДПН, енергії втрат і коефіцієнта корисної дії) від величини і знаку (полярності) початкової напруги ЄНЕ. Визначено енергетично доцільні режими заряду ЄНЕ. Обґрунтовано, що збільшення початкової напруги на конденсаторі призводить до збільшення ККД зарядження. Аналіз співвідношення між дозою енергії, що надходить у ЄНЕ за один цикл заряду  $W_C^*$ , та енергією втрат  $W_{\text{втрат}}^*$  показав, що відношення  $W_C^*/W_{\text{втрат}}^*$  збільшується зі змінням напруги  $U_{0C}$  від  $-U_{\text{ДПН}}$  до  $+U_{\text{ДПН}}$  внаслідок того, що енергія втрат  $W_{\text{втрат}}^*$  зменшується швидше, ніж доза енергії, що надходить у ЄНЕ за один цикл заряду  $W_C^*$ . Бібл. 11, рис. 3, таблиця.*

**Ключові слова:** ємнісний накопичувач енергії, заряд конденсатора, початкова напруга конденсатора, ККД заряду.

Для реалізації у навантаженні електророзрядних установок (ЕРУ) великих імпульсних потужностей і відповідно електричних струмів найбільш поширеним є застосування ємнісних накопичувачів енергії (ЄНЕ) – батарей імпульсних конденсаторів [1–4]. Такі накопичувачі використовуються в ЕРУ для електроімпульсної обробки різних середовищ [5–8]. У більшості імпульсних технологічних установок ЄНЕ заряджають від джерел постійної напруги (ДПН). Найбільш простим, але не достатньо енергоефективним є зарядження ЄНЕ від ДПН при нульовій початковій напрузі на ЄНЕ і повний його розряд до початку наступного заряду [1, 2, 5, 9]. За таких умов коефіцієнт корисної дії (ККД) кіл заряду ЄНЕ від ДПН дорівнює 50 % і не залежить від добротності зарядного кола та інших його параметрів. Цей факт зазначено у багатьох підручниках і літературних джерелах, присвячених аналізу енергетичних процесів у колах зарядження конденсатора, тобто ЄНЕ ємністю  $C$  від джерела постійного напруги  $U_{\text{ДПН}}$  через активний опір  $R$  й індуктивність  $L$  [1, 2, 5, 9]. Під ККД розуміємо відношення величини (доза) електричної енергії  $W_C$ , що надходить у ЄНЕ, до енергії, що відбирається від ДПН за весь час зарядження ЄНЕ.

Дійсно, величина енергії, що відбирається від ДПН, дорівнює [10]:

$$W_{U_{\text{ДПН}}} = \int_0^{\infty} U_{\text{ДПН}} i dt = \int_0^{\infty} (u_R i + u_L i + u_C i) dt = \int_0^{\infty} R i^2 dt + \int_0^0 L i di + \int_0^{U_{\text{ДПН}}} C u_C du_C \quad (1)$$

або

$$U_{\text{ДПН}} \int_0^{U_{\text{ДПН}}} C du_C = C U_{\text{ДПН}}^2 = \int_0^{\infty} R i^2 dt + \frac{C U_{\text{ДПН}}^2}{2}, \quad \text{тобто} \quad \int_0^{\infty} R i^2 dt = \frac{C U_{\text{ДПН}}^2}{2}.$$

З рівняння (1) видно, що в ньому досліджується лише окремий випадок, коли зарядження ЄНЕ ємністю  $C$  здійснюється за нульових початкових умов  $U_C(t=0) = U_{0C} = 0$  та

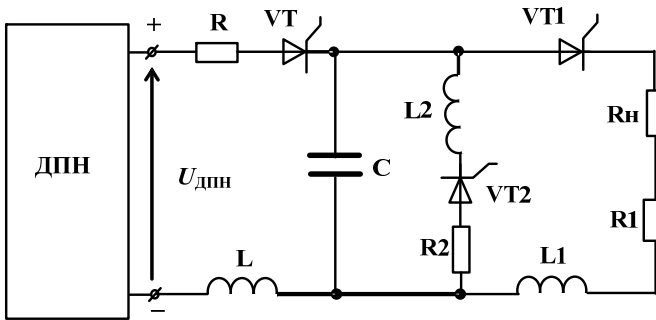


$i(t=0) = 0$ , і за кінцевих умов  $U_C(t=\infty) = U_{кС} = U_{ДПН}$  та  $i(t=\infty) = 0$ .

Однак попередні дослідження авторів показали, що при використанні початкових ненульових напруг на ЄНЕ і використанні напівпровідникових (зокрема тиристорних ключів) ККД та енергетичні характеристики ЕРУ можуть бути підвищені. Ці дослідження виконувались для аперіодичного режиму заряджання як найбільш простого для практичної реалізації.

**Метою** даної роботи є аналіз енергетичних характеристик аперіодичного заряджання ємнісного накопичувача електроенергії від джерела постійної напруги при змінних початкових напругах на ЄНЕ  $U_{0C} = var$  у діапазоні  $-U_{ДПН} < U_{0C} < +U_{ДПН}$  для визначення енергетично найбільш доцільних режимів його заряджання.

За таких умов нульові та кінцеві умови для струму в колі залишаються тими ж:  $i(t=0) = i(t=\infty) = 0$ .



**Рис. 1.** Електрична схема ЕРУ електроіскрового диспергування струмопровідних гранул у рідині

На рис. 1 наведено електричну схему ЕРУ електроіскрового диспергування струмопровідних гранул у рідині. У цій схемі ЄНЕ (власне накопичувальний конденсатор ємністю  $C$ ) заряджається від джерела постійної напруги (ДПН)  $U_{ДПН}$  через резистор  $R$  (активний опір зарядного кола), котушку індуктивності  $L$  і тиристорний комутатор  $VT$ .

Втратами в тиристорному ключі  $VT$  під час протікання струму ми нехтуємо, але його наявність дає змогу розуміти, що аперіодичний процес заряджання не є нескінченним. Він закінчується, коли струм у колі стає менше струму утримання тиристорного ключа у включеному стані. Такий струм залежно від типу тиристора становить 0,3...0,7 А (в оціночних розрахунках ми приймали його 0,5 А) [11].

Параметри зарядного кола вибираються таким чином, щоб виконувалася умова  $\frac{1}{R} \cdot \sqrt{\frac{L}{C}} = Q \leq 0,5$ , де  $Q$  – добротність кола. Відповідно до II закону Кірхгофа після включення тиристора  $VT$  в зарядному колі схеми на рис. 1 можна записати рівняння

$$u_R(t) + u_C(t) + u_L(t) = U_{ДПН}. \quad (2)$$

Враховуючи, що  $u_R(t) = R \cdot i(t)$ ,  $i(t) = C \frac{dU_C(t)}{dt}$ , а  $u_L(t) = L \frac{di(t)}{dt} = LC \frac{d^2 u_C(t)}{dt^2}$ , вираз (2)

матиме вид:

$$LC \frac{d^2 u_C(t)}{dt^2} + RC \frac{du_C(t)}{dt} + u_C(t) = U_{ДПН}. \quad (3)$$

Згідно з класичним методом аналізу перехідних процесів у лінійних електричних колах розв'язок такого неоднорідного рівняння щодо напруги на конденсаторі  $u_C(t)$  можна подати у вигляді суми  $u_C(t) = u_{Свимуш} + u_{Свільн}(t)$  [10], де вимушена складова напруги  $u_{Свимуш} = U_{ДПН}$ , а для знаходження вільної складової напруги  $u_{Свільн}(t)$  треба знайти розв'язок однорідного диференціального рівняння:

$$\frac{d^2 u_{Свільн}(t)}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{du_{Свільн}(t)}{dt} + \frac{1}{LC} u_{Свільн}(t) = 0. \quad (4)$$

Розв'язок такого рівняння записується у вигляді суми двох експонент

$$u_{Свільн}(t) = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t}, \quad (5)$$

де  $A_1$  та  $A_2$  постійні інтегрування, що визначаються з початкових умов, а  $p_1$  та  $p_2$  – корені характеристичного рівняння  $p^2 + \frac{R}{L}p + \frac{1}{LC} = 0$ , які визначаються нерівністю

$$p_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}}.$$

Якщо в момент включення тиристора  $VT$  напруга на конденсаторі  $u_C(t=0) = U_{0C} \neq 0$ , тоді  $u_{C\text{вільн}}(t=0) = u_C(t=0) - u_{C\text{вимуш}} = U_{0C} - U_{\text{ДПН}}$ .

Використовуючи рівняння (5), запишемо

$$U_{0C} - U_{\text{ДПН}} = A_1 + A_2. \quad (6)$$

Беручи до уваги, що  $i_{\text{вільн}}(t) = C \frac{du_{C\text{вільн}}(t)}{dt}$ , отримаємо

$$i_{\text{вільн}}(t) = C(p_1 A_1 e^{p_1 t} + p_2 A_2 e^{p_2 t}). \quad (7)$$

Враховуючи, що  $i(t) = i_{\text{вільн}}(t)$  (оскільки  $i_{\text{вимуш}} = 0$ ), отримуємо для моменту часу  $t = 0$

$$i(t=0) = i_{\text{вільн}}(t=0) = C \frac{du_C(t=0)}{dt} = C \frac{dU_{0C}}{dt} = 0. \quad (8)$$

З виразів (7) і (8) маємо

$$p_1 A_1 + p_2 A_2 = 0. \quad (9)$$

З огляду на (6) і (9) вирази для коефіцієнтів  $A_1$  та  $A_2$  будуть такі:

$$A_1 = \frac{(U_{\text{ДПН}} - U_{0C})p_2}{p_1 - p_2}; \quad A_2 = \frac{-(U_{\text{ДПН}} - U_{0C})p_1}{p_1 - p_2}.$$

Підставляючи ці вирази в (5) і враховуючи, що  $u_C(t) = u_{C\text{вільн}}(t) + U_{\text{ДПН}}$ , запишемо вираз для напруги на конденсаторі:

$$u_C(t) = U_{\text{ДПН}} + \frac{(U_{\text{ДПН}} - U_{0C})}{p_1 - p_2} (p_2 e^{p_1 t} - p_1 e^{p_2 t}) \quad (10)$$

і для струму в зарядному колі:

$$i(t) = C \frac{du_C(t)}{dt} = \frac{C(U_{\text{ДПН}} - U_{0C})}{p_1 - p_2} p_1 p_2 (e^{p_1 t} - e^{p_2 t}). \quad (11)$$

Отримавши вирази для струму і напруги, можна визначити енергетичні характеристики у колі під час заряджання конденсатора  $C$  від ДПН через опір  $R$  та індуктивність  $L$ .

Доза енергії, що відбирається від джерела постійної напруги  $W_{\text{ДПН}}$ , визначається за формулою

$$W_{\text{ДПН}} = \int_0^{\infty} U_{\text{ДПН}} i(t) dt.$$

Після підстановки в неї виразу для струму (11) і інтегрування отримуємо

$$W_{\text{ДПН}} = C U_{\text{ДПН}} (U_{\text{ДПН}} - U_{0C}). \quad (12)$$

Дозу енергії, що надходить у конденсатор за час його заряду, визначено як

$$W_C = \frac{C U_{\text{ДПН}}^2}{2} - \frac{C U_{0C}^2}{2} = \frac{C(U_{\text{ДПН}}^2 - U_{0C}^2)}{2}. \quad (13)$$

Враховуючи (12) і (13), запишемо вирази для енергії втрат у колі  $W_{\text{втрат}}$  та ККД процесу заряджання  $\eta$ :

$$W_{\text{втрат}} = W_{\text{ДПН}} - W_C = \frac{C}{2} (U_{\text{ДПН}} - U_{0C})^2.$$

$$\eta = \frac{W_C}{W_{\text{ДПН}}} = \frac{U_{\text{ДПН}} + U_{0C}}{2U_{\text{ДПН}}}.$$

Було введено відносні енергетичні характеристики та початкова напруга на конденсаторі:



- $W_C^*$  – енергія, що надходить у конденсатор  $W_C$ , приведена до величини  $W_{0\text{ДПН}} = CU_{\text{ДПН}}^2$ , тобто до величини дози енергії, яка відбирається від ДПН при заряджанні повністю розрядженого конденсатора (при  $U_C(t=0) = 0$ ):

$$W_C^* = \frac{W_C}{CU_{\text{ДПН}}^2} = \frac{1}{2} \left[ 1 - \left( \frac{U_{0C}}{U_{\text{ДПН}}} \right)^2 \right];$$

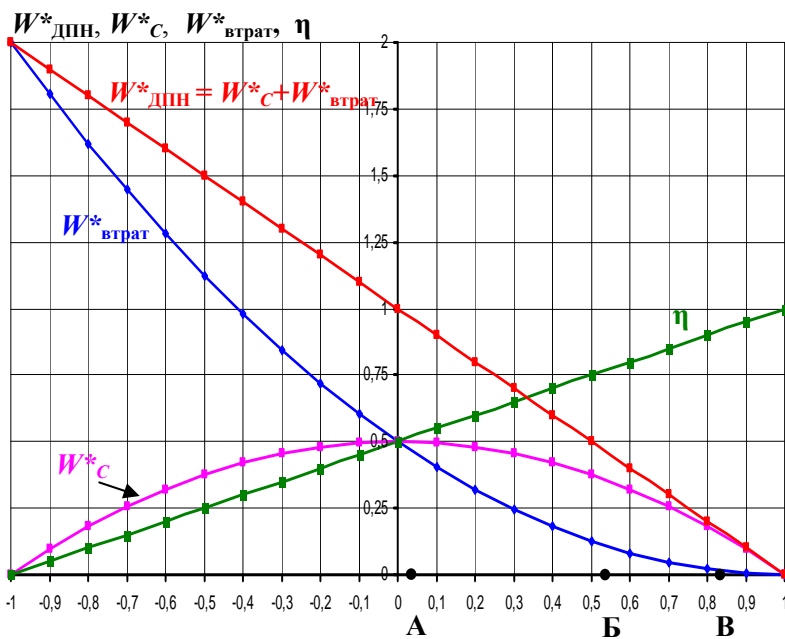
- $W_{\text{втрат}}^*$  – енергія втрат у колі  $W_{\text{втрат}}$ , приведена до величини  $W_{0\text{ДПН}} = CU_{\text{ДПН}}^2$ :

$$W_{\text{втрат}}^* = \frac{W_{\text{втрат}}}{CU_{\text{ДПН}}^2} = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{U_{0C}}{U_{\text{ДПН}}} \right)^2;$$

- доза енергії, що відбирається від ДПН  $W_{\text{ДПН}}^* = W_C^* + W_{\text{втрат}}^*$ ;

- ККД заряджання конденсатора  $\eta$  буде дорівнювати:  $\eta = \frac{W_C^*}{W_{\text{ДПН}}^*} = \frac{W_C}{W_{\text{ДПН}}} = \frac{U_{\text{ДПН}} + U_{0C}}{2U_{\text{ДПН}}}$ .

- $U_{0C}^*$  – початкова напруга на конденсаторі  $U_{0C}$ , приведена до величини напруги ДПН:  $U_{0C}^* = \frac{U_{0C}}{U_{\text{ДПН}}}$ .



**Рис. 2.** Залежності від початкової напруги на конденсаторі  $U_{0C}^*$  відносних енергетичних характеристик  $W_C^*$ ,  $W_{\text{втрат}}^*$ ,  $W_{\text{ДПН}}^*$ ,  $\eta$

Із неї видно, що при  $U_{0C}^* = 0,5$  ККД заряджання конденсатора  $\eta$  зростає в 1,5 рази в порівнянні з ККД при  $U_{0C}^* = 0$ , а при  $U_{0C}^* = 0,8$  – він збільшується майже в 2 рази. Водночас

$U_{0C}^*$	$W_{\text{втрат}}^*$	$W_C^*$	$\eta$	$W_{\text{ДПН}}^*$
0	0,5	0,5	0,5	1
0,5	0,125	0,375	0,75	0,5
0,8	0,02	0,18	0,9	0,2

доза енергії, що надходить у конденсатор  $W_C^*$ , зменшується відповідно в 1,3 і 2,8 разу. Зростання ККД за таких умов пояснюється тим, що енергія втрат у колі зменшується ще інтенсивніше – відповідно у 4 і 25 разів.

На рис. 2 показано залежності від приведеної початкової напруги на конденсаторі  $U_{0C}^*$  відносних енергетичних характеристик  $W_C^*$ ,  $W_{\text{втрат}}^*$ ,  $W_{\text{ДПН}}^*$ ,  $\eta$ .

Для аналізу зміння дози енергії, що надходить у конденсатор, енергії втрат у колі, дози енергії, що відбирається від ДПН, а також ККД в залежності від зміни початкової напруги  $U_{0C}^*$  на конденсаторі розглянемо три точки А, Б, В, в яких початкова напруга на конденсаторі становить відповідно 0, 0,5 та 0,8.

Значення відносних енергетичних характеристик  $W_C^*$ ,  $W_{\text{втрат}}^*$ ,  $W_{\text{ДПН}}^*$  та  $\eta$  для зазначених вище точок А, Б, В представлено в таблиці.

Водночас доза енергії, що відбирається від джерела при  $U_{0C}^* = 0,5$ , зменшується в 2 рази, а при  $U_{0C}^* = 0,8$  – у 5 разів (порівняно з нульовими умовами  $U_{0C}^* = 0$ ). Отже, для споживання такої ж дози енергії від джерела, як і у випадку, що відповідає нульовим початковим умовам по напрузі, можна відповідно в 2 і 5 разів збільшити число циклів заряджання конденсатора за той же проміжок часу.

Таким чином, якщо потрібно мати незмінну середню потужність споживання енергії від джерела, необхідно збільшити частоту зарядних циклів конденсатора відповідно в 2 і 5 разів.

Тобто в загальному випадку має дотримуватися умова  $W_{\text{ДПН}}^* = \sum_1^{f_i} W_{\text{ДПН}_i}^*$ , де  $W_{\text{ДПН}_i}^*$  – доза енергії, що відбирається від ДПН, а  $f_i$  – частота зарядних циклів конденсатора при деякій  $i$ -й початковій напрузі на конденсаторі, відмінній від нуля. Причому також має виконуватися умова  $f_i < \lambda$ , де  $\lambda = T/\tau_0$  – шпаруватість,  $\tau_0$  – тривалість зарядного циклу при  $U_{0C}^* = 0$ , і  $T$  – період повторення зарядних циклів (причому величина  $\lambda$  має бути  $> 1$ ).

За умови стабілізації дози енергії, що відбирається від ДПН за деякий один і той же час  $T$ , протягом якого від ДПН у зарядне коло надходить деяка фіксована доза енергії  $W_{\text{ДПН}_j}^*$ , можна проаналізувати необхідну зміну кількості циклів заряду конденсатора залежно від початкової напруги на ньому.

Відносну дозу енергії, що відбирається від ДПН, визначаємо, використовуючи (12), як:

$$W_{\text{ДПН}}^* = \frac{CU_{\text{ДПН}}(U_{\text{ДПН}} - U_{0C})}{CU_{\text{ДПН}}^2} = 1 - \frac{U_{0C}}{U_{\text{ДПН}}}. \quad (14)$$

Нехай доза енергії, що відбирається від ДПН за час  $t = T$ , повинна залишатися незмінною та рівною дозі енергії  $W_{\text{ДПН при } U_{C_0}=0}^*$ , що відбирається від ФПН при нульовій початковій напрузі на конденсаторі  $U_{0C}^* = 0$ . У цьому випадку для дотримання умови  $W_{\text{ДПН}_i}^* \cdot f_i = W_{\text{ДПН при } U_{C_0}=0}^* \cdot f_0 = \text{const}$  (де  $f_0$  – частота зарядних циклів конденсатора при нульовій початковій напрузі на конденсаторі і незмінній величині ємності конденсатора  $C$ ) має бути справедливим наступний вираз:

$$W_{\text{ДПН}_i}^* \cdot f_i = 1 \cdot f_0. \quad (15)$$

Вводячи відносну частоту зарядних циклів конденсатора при деякій  $i$ -й початковій напрузі на конденсаторі  $f_i^* = \frac{f_i}{f_0}$  і використовуючи вираз (14), отримаємо

$$f_i^* = \frac{1}{1 - \frac{U_{C_0}}{U_{\text{ДПН}}}}. \quad (16)$$

Аналогічний вираз можна отримати і для зміни величини ємності конденсатора  $C_i$  при  $i$ -й ненульовій початковій його напрузі і незмінній частоті циклів заряду  $f_i^* = \text{const}$ , що випливає з виразу

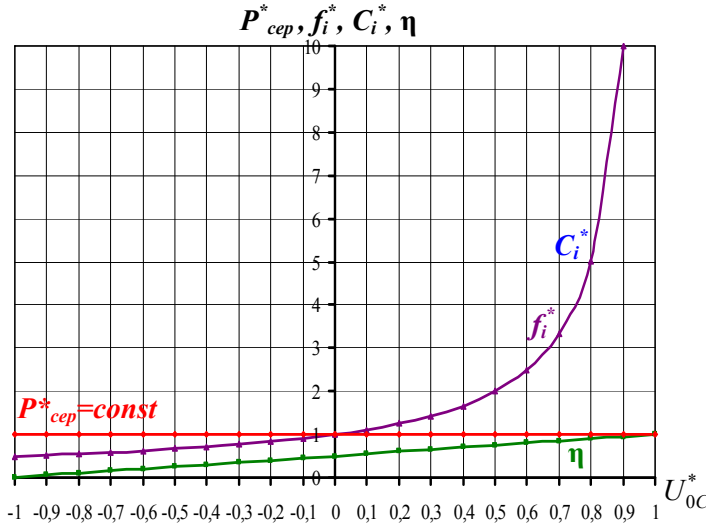
$$C_0 U_{\text{ДПН}}^2 = C_i \cdot U_{\text{ДПН}} (U_{\text{ДПН}} - U_{0C_i}), \quad (17)$$

де  $C_0$  – ємність конденсатора при  $U_{0C} = 0$ , а  $C_i$  – його ємність при ненульовій  $i$ -й початковій напрузі  $U_{0C_i} \neq 0$ .

Тоді вираз для відносної ємності конденсатора  $C_i^*$  при ненульовій  $i$ -й початковій напрузі (приведена до ємності при нульовій його початковій напрузі) буде

$$C_i^* = \frac{C_i}{C_0} = \frac{1}{1 - \frac{U_{0C}}{U_{ДПН}}} \quad (18)$$

Відзначимо, що при відносних значеннях, вибраних у такий спосіб, вирази (16), (18) для  $f_i^*$  і  $C_i^*$  є однаковими.



**Рис. 3.** Залежність частоти зарядних циклів конденсатора  $f_i^*$ , ємності конденсатора  $C_i^*$  і ККД  $\eta$  зарядного процесу від відносної початкової напруги на конденсаторі  $U_{0C}^*$  при стабілізації дози енергії, що відбирається від ДПН, за час  $t = T$

Залежність частоти зарядних циклів конденсатора  $f_i^*$ , ємності конденсатора  $C_i^*$  і ККД  $\eta$  зарядного процесу від відносної початкової напруги на конденсаторі  $U_{0C}^*$  при стабілізації дози енергії, що відбирається від ДПН, за час  $t = T$ , показано на рис. 3.

Таким чином, можна реалізувати режим заряду конденсатора з високим ККД ( $\eta > 0,5$ ) при постійній споживаній від ДПН потужності за час  $t = T$ , збільшуючи початкову напругу на конденсаторі при одночасному збільшенні (відповідно до виразу (16)) частоти зарядних циклів конденсатора за час  $t = T$  або ємності конденсатора (відповідно до виразу (18)) при незмінній частоті циклів зарядання. Можна також зі збільшенням початкової напруги на конденсаторі збільшувати добуток

$f_i^* \cdot C_i^*$ . Однак треба враховувати, що при збільшенні ємності збільшуватиметься час зарядання конденсатора і амплітудне значення струму в зарядному колі.

**Висновки.** Встановлено закономірності регулювання енергетичних характеристик аперіодичного зарядання ємнісного накопичувача електроенергії від джерела постійної напруги шляхом змінення початкових напруг на такому накопичувачі:

1. При зміні початкової напруги  $U_{0C}$  на ЄНЕ змінюється доза енергії, що надходить у ЄНЕ за один цикл зарядання. Максимальною ця доза буде за нульових початкових умов на ЄНЕ ( $U_{0C} = 0$ ), а мінімальних значень набуватиме при значеннях  $U_{0C} = -U_{ДПН}$  та при значеннях  $U_{0C}$ , близьких до  $+U_{ДПН}$ .

2. При зміні початкової напруги на ЄНЕ  $U_{0C}$  енергія втрат у зарядному колі зменшується від свого максимального значення при  $U_{0C} = -U_{ДПН}$  до мінімальних значень при наближенні  $U_{0C}$  до  $+U_{ДПН}$ . Оскільки енергія втрат набуває найбільших значень при  $U_{0C}$ , близьких до  $-U_{ДПН}$ , таких режимів зарядання ЄНЕ у схемах ЕРУ слід уникати.

3. При аперіодичному заряданні ЄНЕ ємністю  $C$  від джерела постійної напруги  $U_{ДПН}$ , ККД зарядного процесу  $\eta$  лінійно збільшується зі збільшенням величини початкової напруги на ЄНЕ  $U_{0C}$ :  $\eta$  зростає від нульового значення при  $U_{0C} = -U_{ДПН}$  і прямує до 1 при значеннях  $U_{0C}$ , близьких до  $+U_{ДПН}$  (зазначимо, що при умові  $U_{0C} = +U_{ДПН}$  зарядання ЄНЕ не відбувається саме внаслідок відсутності різниці потенціалів у колі, необхідної для початку процесу зарядання). Лінійне зростання ККД зі зростанням напруги  $U_{0C}$  в досліджуваному діапазоні зумовлено тим, що при цьому збільшується співвідношення між дозою енергії, що надходить у ЄНЕ, і енергією втрат у колі. Так, при  $U_{0C} = 0,5U_{ДПН}$  доза енергії, що надходить у ЄНЕ, зменшиться в 1,33 разу, в той час як енергія втрат зменшиться в 4 рази

(порівняно з дозами енергії при  $U_{0C} = 0$ ), а при  $U_{0C} = 0,8U_{дпн}$  відповідні дози зменшаться у 2,78 та 25 разів.

4. При стабілізації дози енергії, що споживається від джерела за час  $t = T = f_i T_i$ , можна реалізовувати режими заряду ЄНЕ з досить високим ККД ( $\eta > 0,5$ ), збільшуючи початкову напругу на ЄНЕ при одночасному збільшенні частоти зарядних циклів конденсатора при незмінній його ємності, або при одночасному збільшенні величини ємності ЄНЕ при незмінній частоті його зарядних циклів. Також можна збільшувати добуток частоти та ємності, однак треба враховувати, що при збільшенні ємності збільшуватиметься час заряджання ЄНЕ і амплітудне значення струму в зарядному колі.

*Дослідження виконані за Проєктом № 2022.01/0211 "Розробка мобільної системи формування напруги зі змінними параметрами для моніторингу безпеки і надійності високовольтного електрообладнання енергетичних об'єктів критичної інфраструктури України", який фінансується Національним фондом досліджень України.*

1. Фрюнгель Ф. Импульсная техника. Генерирование и применение разрядов конденсаторов. М.: Наука, 1970. 320 с.
2. Пентегов І.В. Основы теории зарядных цепей емкостных накопителей энергии. К.: Наук. думка. 1982. 422 с.
3. Вовченко А.И., Тертилов Р.В. Синтез емкостных нелинейно-параметрических источников энергии для разрядно-импульсных технологий. Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування. 2010. № 4. С. 118–124.
4. Кравченко В.И., Петков А.А. Параметрический синтез высоковольтного импульсного испытательного устройства с емкостным накопителем энергии. *Електротехніка і Електромеханіка*. 2007. № 6. С. 70–75.
5. Nguyen P.K., Sugho 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/1.4868330>
6. Casanueva R., Azcondo F.J., Branas 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>
7. Вовченко А.И., Демиденко Л.Ю., Блащенко А.Д., Старков И.Н. Повышение эффективности высоковольтных электроразрядных установок, использующих экзотермические дисперсные среды. *Технічна електродинаміка*. 2019. № 5. С. 77–82. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.05.077>
8. Ochín P., Gilchuk A.V., Monastyrsky G.E., Koval Y., Shcherba A.A., Zaharchenko S.N. Martensitic Transformation in Spark Plasma Sintered Compacts of Ni-Mn-Ga Powders Prepared by Spark Erosion Method in Cryogenic Liquids. *Materials Science Forum*, 2013, Vol. 738–739, Pp. 451–455. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.738-739.451>
9. Вовченко А.И., Богуславский Л.З., Мирошниченко Л.Н. Тенденции развития мощных высоковольтных генераторов импульсных токов в ИИПТ НАН Украины. *Технічна електродинаміка*. 2010. № 5. С. 69–74.
10. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. Основы теории цепей. М: Энергия, 1975. 752 с.
11. Григорьев О.П., Замятин В.Я., Кондратьев Б.В., Пожидаев С.Л. Тиристоры: Справочник. М.: Радио и связь, 1990. 272 с.

## REGULATION OF THE CHARGING CIRCUIT CHARACTERISTICS OF CAPACITIVE ENERGY STORAGE BY CHANGING ITS INITIAL VOLTAGE DURING APERIODIC CHARGING FROM A DC VOLTAGE SOURCE

**A.A. Shcherba, N.I. Suprunovska**

Institute of Electrodynamics of NAS Ukraine,  
Beresteisky ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine

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

*An analysis of the transient processes during aperiodic charging of the capacitive energy storage (CES) of the electrical discharge installation (EDI) from the source of direct voltage (SDV) of the  $U_{SDV}$  was carried out under the condition of changing the initial voltage of the CES at the time of the start of charging. The dependences of energy characteristics (dose of energy that powers the capacitor, energy losses and efficiency) on the magnitude and sign (polarity) of the initial voltage CES were obtained. The energetically appropriate CES charge modes were determined. It is substantiated that increasing the initial voltage of the capacitor leads to an increase in the charging efficiency. The analysis of the ratio between the dose of energy that powers the CES during one charge cycle  $W_C^*$  and the energy of losses  $W_{losses}^*$  showed that the ratio  $W_C^*/W_{losses}^*$  increases with a change in the voltage  $U_{0C}$  from  $-U_{SDV}$  to  $+U_{SDV}$  due to the fact that the energy of losses  $W_{losses}^*$  decreases faster than the dose of energy that powers the CES. Ref. 11, fig. 3, table.*

**Key words:** capacitive energy storage, capacitor charging, capacitor initial voltage, charging efficiency.

1. Fryungel F. Pulse technique. Generation and application of capacitor discharges. Moscow: Nauka, 1970. 320 p. (Rus)
2. Pentegov I.V. Fundamentals of the theory of charging circuits of capacitive energy storage devices. Kyiv: Naukova Dumka, 1982. 422 p. (Rus)
3. Vovchenko A.I., Tertilov R.V. Synthesis of nonlinear parametric capacitive energy sources for a discharge pulse technologies. *Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnogo universytetu korablebuduvania*. Mykolaiv, 2010. No 4. Pp. 118–124. (Rus)
4. Kravchenko V.I., Petkov A.A. Parametrical synthesis of high-voltage pulse test devices with capacitive energy storage. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2007. No 6. Pp. 70–75. URI: <http://dspace.nbu.gov.ua/handle/123456789/142945> (Rus)
5. Nguyen P.K., Sugho 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/1.4868330>
6. Casanueva R., Azcondo F.J., Branas 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>
7. Vovchenko O.I., Demydenko L.Yu., Blashchenko O.D., Starkov I.M. Improving the efficiency of high-voltage electric discharge installations which use exothermal dispersed media. *Tekhnichna Electrodynamica*. 2019. No 5. Pp. 77–82. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.05.0077> (Rus)
8. Ochinnikov P., Gilchuk A.V., Monastyrsky G.E., Koval Y., Shcherba A.A., Zaharchenko S.N. Martensitic Transformation in Spark Plasma Sintered Compacts of Ni-Mn-Ga Powders Prepared by Spark Erosion Method in Cryogenic Liquids. *Materials Science Forum*, 2013. Vol. 738–739. Pp. 451–455. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.738-739.451>
9. Kravchenko V.I., Petkov A.A. Parametrical synthesis of high-voltage pulse test devices with capacitive energy storage. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2007. No 6. Pp. 70–75. URI: <http://dspace.nbu.gov.ua/handle/123456789/142945> (Rus)
10. Zeveke G.V., Ionkin P.A., Netushil A.V., Strakhov S.V. Fundamentals of Circuit Theory. Textbook for universities. Moscow: Energy, 1975. 752 p. (Rus)
11. Grigoriev O.P., Zamiatin V.Ya., Kondratiev B.V., Pozhidaev S.L. Thyristors: Grigoriev O.P., Zamiatin V.Ya., Kondratyev B.V., Pozhidaev S.L. Thyristors: Handbook. Moscow: Radio i Sviaz', 1990. 272 p. (Rus)

Надійшла: 16.06.2024

Прийнята: 17.07.2024

Submitted: 16.06.2024

Accepted: 17.07.2024

**ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНІ КОМПЛЕКСИ ТА СИСТЕМИ**

УДК 621.365.51

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2024.68.013>**БАГАТОШАРОВІ ІНДУКТОРИ ДЛЯ УСТАНОВКИ ІНДУКЦІЙНОЇ  
ТЕРМООБРОБКИ АЛЮМІНІЄВИХ ЗЛИВКІВ ПРИ ПРЕСУВАННІ КАТАНКИ  
ДЛЯ СИЛОВИХ КАБЕЛІВ**

**А.Ф. Жаркін**<sup>1\*</sup>, акад. НАН України, **Ю.М. Гориславець**<sup>1\*\*</sup>, докт. техн. наук,  
**О.І. Глухенький**<sup>1\*\*\*</sup>, канд. техн. наук, **Р.В. Білянin**<sup>2\*\*\*\*</sup>, канд. техн. наук

1 – Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна,  
2 – ПАТ "ЗАВОДПІВДЕНКАБЕЛЬ",  
вул. Автогенна, 7, Харків, 61099, Україна

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

*На основі розробленої математичної моделі проведено комп'ютерне (чисельне) моделювання електротеплових процесів в установці з багатошаровим індуктором, яка служить для нагрівання циліндричних алюмінієвих зливків (заготовок) перед пресуванням катанки, як основи для отримання із неї струмопровідних жил силових кабелів. Досліджувалися однофазний і трифазний багатошарові індуктори галетного типу, у результаті чого показано, що максимальне значення електричного ККД такої установки для обох індукторів забезпечує тришарова намотка їх водоохолоджуваною мідною трубкою прямокутного перерізу. Для обох індукторів отримано розподіли за радіусом і довжиною алюмінієвих заготовок об'ємної питомої потужності та питомої лінійної потужності тепловиділень від наведених у заготовках вихрових струмів. Для трифазного індуктора такі розподіли отримано за живлення його напругами з кутами фазового зсуву у 120 і 60 ел град. Досліджено також втрати у витках індукторів та їхній розподіл за довжиною і шарами обох індукторів. Бібл. 8, рис. 7, табл. 2.*  
**Ключові слова:** електротеплові процеси, індукційна термообробка, алюмінієві зливки, однофазні й трифазні багатошарові індуктори, комп'ютерне моделювання, ефективність електротермообробки.

**Вступ.** Останнім часом унаслідок значного дефіциту міді намітилась тенденція до більш широкого використання в електроенергетичній галузі струмопровідних виробів із алюмінію. Особливо це стосується кабельної продукції, включаючи силові кабелі на високу і надвисоку напруги [1, 2]. При виробництві високоякісної електротехнічної струмопровідникової продукції з алюмінію найбільш поширеним є використання алюмінієвих циліндричних зливків, з яких шляхом попередньої градієнтної термообробки (нагрівання) та подальшого пресування (екструзії) отримують пруток (катанку), як основу для виготовлення із нього багатодровових струмопровідних жил силових кабелів.

Для нагрівання алюмінієвих зливків (заготовок) існує два типи нагрівальних пристроїв: печі електроопору з повітряною циркуляцією та індукційні нагрівачі. Переважно для цього використовують другий тип пристроїв, а саме електроіндукційні установки промислової частоти. Це пов'язано з тим, що їхнє застосування дає змогу скоротити тривалість нагрівання зливка, зберегти чистоту нагрітого металу, знизити втрати на угар. Окрім того, площа, яку займає індукційна установка, значно менша, ніж піч опору, завдяки чому більш успішно вирішуються процеси автоматизації нагрівання та комплексної механізації подачі нагрітого зливка.

На підприємствах із виготовлення кабельної продукції широкого застосування набула установка для індукційного нагрівання алюмінієвих заготовок, схема якої показана на рис. 1. Конструктивна будова установки описана в роботах [2, 3]. Основу її складає циліндричний





однофазний індуктор 1 довжиною 2,2 м, намотаний на азбестову трубу 2 в один шар мідною водоохолоджуваною трубкою. Призначення такої установки – нагрівати в безперервному режимі рухомі циліндричні алюмінієві заготовки 3 діаметром 178 мм і довжиною 438 мм кожна від температури доквілля (на вході установки) до температури  $\sim 430^{\circ}\text{C}$  (на виході). Зовні індуктора знаходиться шихтований магнітопровід 4.

Рух заготовок в індукторі носить циклічний характер, тобто заготовки переміщуються через зону нагрівання дискретно. Загальна тривалість кожного циклу становить  $\sim 60$  с, яка складається із тривалості переміщення із заданою швидкістю  $\sim 3$  м/хв усіх заготовок на довжину однієї заготовки (приблизно 9 с) і тривалості нерухомого (загальмованого) стану. Слід зазначити, що за вказаної довжини індуктора всередині його постійно знаходяться шість заготовок, дві з яких (крайні) у нерухомому положенні приблизно наполовину виступають за межі індуктора (див. рис. 1), а загальна довжина всіх заготовок складає  $438 \times 6 = 2628$  мм. Таку установку інколи ще називають індукційним нагрівачем безперервної дії з дискретним рухом (переміщенням) заготовок.

Електроживлення індуктора установки забезпечується підключенням його до лінійної напруги промислової електромережі 380 В частотою 50 Гц.

У роботі [3] проведено дослідження електротеплових процесів у такій установці з метою підвищення її ефективності шляхом вдосконалення конструкції індуктора установки та визначення доцільних варіантів його живлення. Для цього було розроблено математичну модель для чисельного (комп'ютерного) дослідження зазначених процесів за заданої напруги на індукторі з урахуванням розподілу густини струму в його витках. Модель реалізовано в програмному середовищі Comsol Multiphysics [4]. Адекватність моделі перевірялася на типовій промисловій установці, яка використовується на підприємстві ПАТ "ЗАВОДПІВДЕНКА-БЕЛЬ" (м. Харків) у технології виробництва струмопровідних жил для кабельної продукції. Розбіжність розрахованих електромагнітних параметрів і параметрів діючої установки не перевищила 5 %.

У зазначеній роботі на основі розробленої моделі визначено вплив профілю поперечного перерізу струмопроводу витків одношарового індуктора на ККД індукційної установки. Показано, що найбільше впливає на її ефективність ближня до заготовки стінка прямокутної мідної трубки індуктора. Оптимальна (раціональна) товщина її знаходиться на рівні глибини проникнення електромагнітного поля в метал. Використання індуктора з таким струмопроводом дає змогу приблизно на 30 % підвищити ККД типової установки, що має індуктор, усі стінки якої мають однакову товщину (2 мм).

Інший шлях зменшення втрат активної потужності в індукторі – використання багатошарових котушок [5]. Електричні втрати в багатошаровій котушці здебільшого залежать від її конструкції і в разі правильного вибору струмопровідних провідників та їхньої відповідній намотці можуть бути значно менші ніж в одношаровій котушці. Найбільший ефект від використання багатошарових котушок досягається в установках великої потужності, особливо за нагрівання металів з високою електропровідністю (міді, алюмінію).

Відомо два конструктивні рішення багатошарових індукторів (рис. 2) [5]. На рис. 2 а показана схема індуктора на основі декількох послідовно з'єднаних концентричних соленоїдів. Число шарів-соленоїдів зазвичай не перевищує трьох. Такі індуктори, як виявилось, мають низьку ремонтпридатність та часто мають електричний ККД менший ніж одношарові.

Упродовж останніх років перевагу надають багатошаровим індукторам, виконаним із послідовно з'єднаних секцій у вигляді галет (рис. 2 б). Число шарів у галеті може бути різним: від 3 і більше. Такі індуктори в разі правильного вибору перерізу струмопровідних провідників, за даними [6], мають достатньо високий ККД.

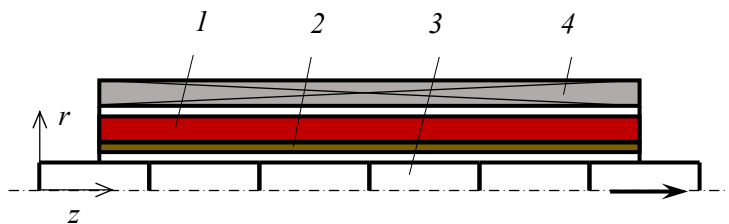
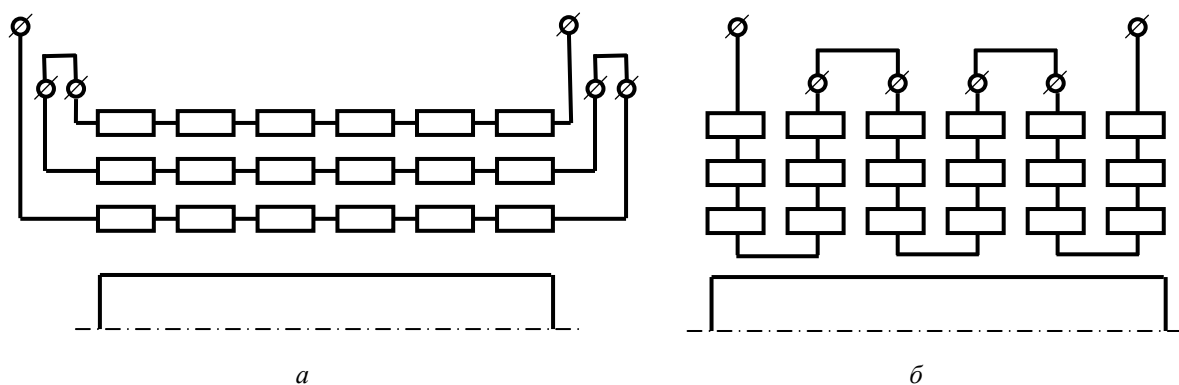


Рис. 1. Схема установки для індукційного нагрівання алюмінієвих заготовок



**Рис. 2.** Конструктивні рішення багат шарових індукторів: *a* – схема багат шарового індуктора на основі послідовно з'єднаних концентричних соленоїдів; *б* – схема індуктора, виконаного із послідовно з'єднаних секцій у вигляді галет

На основі проведених раніше досліджень було показано, що  $n$ -шарові індуктори можуть мати втрати в  $\sqrt{n}$  раз нижчі, ніж одношарові за тієї ж корисної потужності. Для цього товщина (висота) провідників за радіусом індуктора повинна дорівнювати  $1,32\Delta/\sqrt{ng}$  [7], де  $\Delta$  – глибина проникнення струму в метал провідника,  $g$  – коефіцієнт заповнення індуктора провідниками за довжиною.

Якщо число шарів 9–10, то втрати теоретично можуть бути в 3 рази менші ніж в одношаровому індукторі. Проте, оскільки ці дослідження виконувалися за достатньо грубих спрощень і припущень (у цих розрахунках не враховуються додаткові втрати внаслідок крайових ефектів, збільшення радіусу шарів та інші фактори), то реальні втрати в таких індукторах будуть більшими, а їхнє значення може бути визначено тільки в результаті чисельного моделювання.

Практична реалізація багат шарових індукторів з великим струмовим навантаженням потребує інтенсивного охолодження, зокрема водяного. Індуктор у такому випадку зазвичай виготовляють із водоохолоджуваної трубки, здебільшого з міді. Ураховуючи, що товщина стінки такої трубки з технологічного погляду її виготовлення має бути не менше 2 мм, а внутрішній розмір її за умови надійного охолодження технічною водою, як показує практичний досвід, повинен складати не менше 8 мм, то мінімально допустимий габаритний розмір поперечного перерізу мідної трубки має бути на рівні 12 мм. Це значення приблизно дорівнює оптимальному (обрахованому згідно з наведеним вище виразом) значенню для  $n = 1$ , тобто для одношарового індуктора. Для двошарового індуктора оптимальна товщина (висота) трубки приблизно складає 9 мм, а для індуктора із більшою кількістю шарів цей розмір стає ще меншим. Таким чином, виходячи з наведених міркувань, отримати багат шаровий індуктор з оптимальними товщинами водоохолоджуваної мідної трубки неможливо.

А втім, видається доцільним дослідити багат шарові індуктори та визначити можливість їхнього використання в установках індукційного нагрівання перед пресуванням алюмінієвих заготовок для підвищення їхньої ефективності. Отже, **метою цієї роботи** є визначення електричних втрат у багат шарових індукторах, а також визначення ККД установок із такими індукторами для індукційної термообробки алюмінієвих зливків при пресуванні катанки для силових кабелів. Дослідження цього питання виконувалося шляхом комп'ютерного моделювання електротеплових процесів у зазначеній установці з використанням розробленої та представленої в роботі [3] математичної моделі.

**Результати моделювання установки з однофазним багат шаровим індуктором.** Як і раніше [3], при моделюванні багат шарового індуктора було прийнято, що його довжина складає 2200 мм, а внутрішній діаметр – 228 мм. Живлення індуктора здійснюється напругою 380 В. Загальна кількість витків індуктора  $N$ , яка рівномірно розбивалася на  $n$  шарів, у кожному випадку підбиралася такою, щоб за заданої напруги забезпечити температуру алюмінієвих заготовок на виході  $\sim 430$  °С. Товщина стінок прямокутної мідної трубки витків



індуктора приймалась однаковою та рівною 2 мм. Габаритна висота  $h$  трубки витка для всіх варіантів приймалась мінімально можливою, тобто 12 мм, а ширина  $b$  за такої умови вибиралася такою, щоб усі витки були рівномірно розміщені за довжиною індуктора із зазором (на ізоляцію) приблизно 2 мм між провідниками.

У табл. 1 представлено розрахункові значення електричних параметрів однофазних двошарового ( $n = 2$ ), тришарового ( $n = 3$ ) і чотиришарового ( $n = 4$ ) індукторів, отриманих для установки із зовнішнім магнітопроводом і у його відсутності. У ній позначено:  $I$  – ефективне значення струму в індукторі,  $P$  – активна потужність установки,  $P_{Al}$  – потужність тепловиділення в алюмінієвих заготовках,  $P_{Cu}$  – втрати в індукторі,  $\cos\varphi$  – коефіцієнт потужності електромагнітної системи установки,  $\eta_e$  – електричний ККД установки.

Таблиця 1

$n$	$b \times h$ , мм	$N$	$I$ , А	$P$ , кВт	$P_{Al}$ , кВт	$P_{Cu}$ , кВт	$\cos\varphi$	$\eta_e$	Примітка
2	28×12	146	3798	707,7	216,4	484,3	0,319	0,447	З магнітопр.
			4003	727,9	220,2	507,7	0,317	0,434	Без магнітопр.
3	48×12	132	4143	657,3	206,5	450,8	0,272	0,458	З магнітопр.
			4415	684	212,3	471,7	0,267	0,450	Без магнітопр.
4	71×12	120	4486	633,2	195,6	437,6	0,244	0,447	З магнітопр.
			4838	661,9	203,3	458,6	0,237	0,443	Без магнітопр.

Ураховуючи, що ККД одношарового однофазного індуктора, намотаного «на ребро» прямокутною рівнотовщинною мідною трубкою, типової індукційної установки (як було показано в роботі [3]), приблизно складає 0,39, виходить, що багатошарова намотка індуктора «пластом» (більшою стороною трубки до заготовки) підвищує ефективність індуктора. Це підтверджує відомі рекомендації з намотки обмоток електрообладнання, зокрема силових трансформаторів, згідно з якими в обмотках, в яких превалює осьовий напрям магнітного поля розсіювання, необхідно розміщувати прямокутний провід таким чином, щоб більший розмір його поперечного перерізу знаходився в осьовому напрямі котушки, тобто необхідно мотати такий провід «пластом» («плашмя» рос. мовою) [8]. Проте здебільшого цього не дотримуються через неможливість розміщення на заданій довжині необхідної кількості витків одношарового індуктора. Як впливає з табл. 1, цю проблему може вирішити багатошарова намотка. Згідно з даними цієї таблиці максимальний електричний ККД у такому випадку (для прийнятої типової установки) має тришаровий індуктор. Його використання дає змогу підвищити ефективність індукційної установки приблизно на 18 %.

Водночас коефіцієнт потужності ( $\cos\varphi$ ) електромагнітної системи «індуктор-заготовка» зі зростанням кількості шарів намотки індуктора послідовно зменшується зі значення 0,364 для одношарового індуктора до 0,272 для тришарового індуктора. Як наслідок, за сталої напруги живлення також зменшується загальна кількість витків індуктора  $N$ , яка необхідна для забезпечення заданої температури алюмінієвих заготовок на виході. Отримані дані ще раз підтверджують висновок про те, що вплив зовнішнього шихтованого магнітопроводу на ККД та коефіцієнт потужності установки незначний.

Для тришарового однофазного індуктора на рис. 3 показано розподіл за радіусом та довжиною заготовок об'ємної питомої потужності  $Q_V$  тепловиділень від наведених в заготовках вихрових струмів, яка визначалася за результатами розрахунків відповідно до виразу

$$Q_V = 0,5J\dot{J}^* / \sigma(T),$$

де  $\sigma(T)$  – залежна від температури  $T$  питома електропровідність матеріалу заготовки (алюмінію),  $J$  та  $\dot{J}^*$  – комплексна та комплексно-спряжена амплітуди єдиної азимутальної складової густини електричного струму.

На рис 3 а зображено розподіл  $Q_V$  за радіусом у п'яти поперечних перерізах, що проходять через стики окремих заготовок (див. рис. 1), де  $R$  – радіус заготовки. Нумерація кривих, яка зростає в напрямку руху заготовок в індукторі, відповідає нумерації стиків, познач

чених на рис. 3 б. Як видно з наведених на рис. 3 а кривих, потужність тепловиділення в заготовках за довжиною індуктора є суттєво нерівномірною. Під час руху заготовок унаслідок зменшення питомої електропровідності алюмінію у випадку нагрівання з одного боку дещо зменшується значення  $Q_V$  на поверхні заготовок (за  $r = R$ ), а з іншого – завдяки збільшенню проникнення електромагнітного поля за  $r < R$  значення  $Q_V$  у середині заготовки збільшується.

Розподіл за довжиною заготовок потужності  $Q_V$  на поверхні заготовок показано на рис 3 б. На цьому ж рисунку також наведено розподіл за довжиною питомої лінійної потужності тепловиділення в заготовках  $Q_L$ . Вона визначалася шляхом перемноження радіальної складової вектора густини потоку енергії електромагнітного поля через бічну поверхню заготовок на її периметр відповідно до виразу

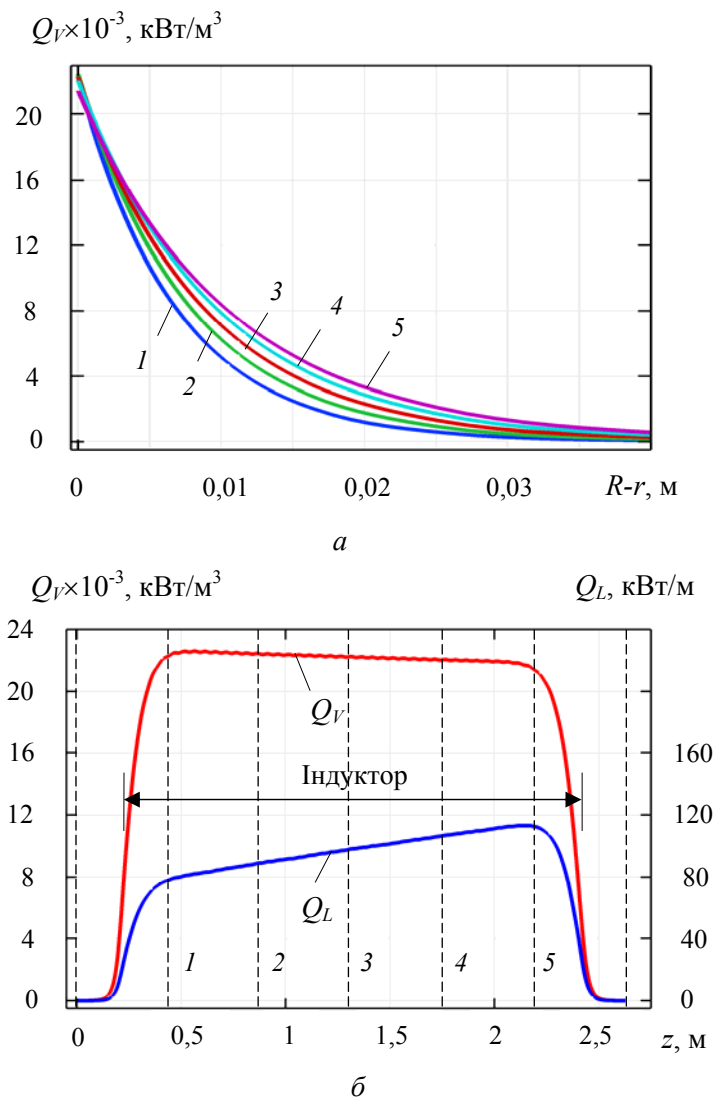
$$Q_L = 0,5 \operatorname{Re}(j\omega \dot{A} \dot{H}_z^*) \cdot 2\pi R,$$

де  $\omega = 2\pi\nu$  – кругова частота,  $\dot{A}$  – комплексна амплітуда єдиної азимутальної складової векторного магнітного потенціалу,  $\dot{H}_z^*$  – комплексно-спряжена амплітуда  $z$ -складової (за довжиною індуктора) напруженості магнітного поля.

Незважаючи на доволі суттєву нерівномірність розподілу тепловиділень, температура заготовок у тришаровому однофазному індукторі за довжиною індуктора зростає практично лінійно, і її розподіл майже нічим не відрізняється від розподілу температури в разі нагрівання заготовок в одношаровому однофазному індукторі, отриманого в попередній роботі [3].

**Результати моделювання електротеплових процесів в установці з трифазним багат шаровим індуктором.** Аналогічні дослідження процесу нагрівання рухомих алюмінієвих заготовок виконувалися також для індукційної установки з трифазним багат шаровим індуктором. Досліджувалися тришарова, чотиришарова і п'ятишарова намотки індуктора за живлення трьох однакових фазних секцій напругою 380 В із фазовим зсувом  $\psi$  між сусідніми секціями 120 і 60 ел. град. Моделювання виконувалося за наявності спільного для всього індуктора циліндричного магнітопровода. Всі три секції індуктора розміщалися без додаткового проміжку між собою. Двошарова намотка індуктора не розглядалася, оскільки для того, щоб розмістити три фазні секції з такою намоткою на заданій довжині в разі їхнього живлення зазначеною напругою, необхідно використати мідну трубку, ширина якої значно менша 12 мм.

Електричні параметри індукційної установки з трифазним багат шаровим індуктором, отримані в результаті проведеного моделювання, представлено в табл. 2. Через  $N_s$  по-



**Рис. 3.** Розподіл за радіусом (а) та довжиною (б) заготовок об'ємної питомої потужності  $Q_V$  тепловиділень від наведених в заготовках вихрових струмів

значено число витків у кожній фазній секції індуктора (однакове для всіх трьох секцій). Параметри з цифровими індексами в ній відносяться до окремих секцій індуктора (нумерація секцій за рухом заготовок), а без індексів – до індуктора в цілому.

Таблиця 2

$n$	$b \times h$ , мм	$N_s$	$\psi$ , ел.гр	$I_1$ , А	$I_2$ , А	$I_3$ , А	$P_1$ , кВт	$P_2$ , кВт	$P_3$ , кВт	$P$ , кВт	$P_{Al}$ , кВт	$P_{Cu}$ , кВт	$\cos\varphi_1$	$\cos\varphi_2$	$\cos\varphi_3$	$\eta_e$
3	15×12	126	120	1564	1538	1482	131	152	165	448	208	240	0,221	0,260	0,293	0,466
			60	1520	1449	1442	126	141	159	426	206	220	0,219	0,256	0,291	0,484
4	24×12	112	120	1786	1762	1691	137	169	184	489	209	280	0,202	0,252	0,286	0,427
			60	1722	1634	1628	128	149	172	449	205	244	0,196	0,239	0,279	0,457
5	35×12	100	120	2055	2029	1926	152	201	216	568	211	357	0,194	0,261	0,295	0,371
			60	1960	1843	1837	134	163	194	492	206	286	0,180	0,232	0,279	0,418

З табл. 2 видно, що, як і у випадку однофазного індуктора, максимальний електричний ККД установка має за тришарової намотки індуктора. Порівняно з однофазним одношаровим індуктором типової установки перехід на трифазний тришаровий індуктор дає змогу підвищити її ефективність залежно від системи живлення (кута  $\psi$ ) на (19-24) %. Ба більше, трифазне виконання багатошарового індуктора за енергетичною ефективністю має навіть деяку перевагу над однофазним багатошаровим індуктором. Так, для тришарових індукторів із магнітопроводом у першому випадку за кутів  $\psi = 60$  ел. град. та  $\psi = 120$  ел. град. значення ККД відповідно складає 48,4 та 46,6 %, а для другого випадку – 45,8 %.

Таким чином, багатошарове трифазне виконання індуктора дає змогу не тільки покращити енергетичну ефективність індукційного нагрівання алюмінієвих заготовок порівняно з наявним однофазним одношаровим індуктором, а й забезпечити практично рівномірне навантаження трифазної промислової електромережі за безпосереднього підключення до її номінальної (стандартної) напруги.

За аналогією з однофазним багатошаровим індуктором визначено розподіл потужності тепловиділення в металі заготовок для кожного з розглянутих варіантів електроживлення трифазного індуктора (кутів  $\psi$ ). На рис. 4 для тришарового трифазного індуктора наведено розподіли за довжиною об'ємної питомої потужності тепловиділень  $Q_V$  на поверхні заготовок (червоним кольором) та питомої лінійної потужності тепловиділення в заготовках  $Q_L$

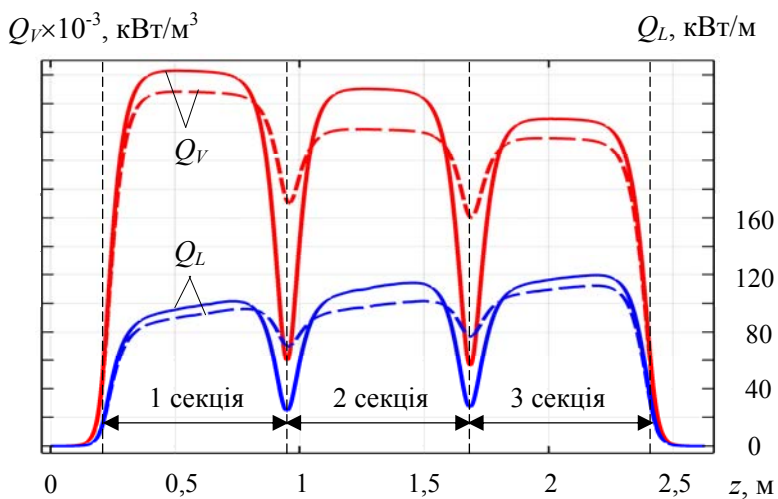


Рис. 4. Розподіли за довжиною об'ємної питомої потужності тепловиділень  $Q_V$  на поверхні заготовок (червоний колір) та питомої лінійної потужності тепловиділення в заготовках  $Q_L$  (синій колір)

(синім кольором). Результати для  $\psi = 120$  ел. град. показано суцільними кривими, для  $\psi = 60$  ел. град. – пунктирними. Як видно з наведених кривих, у зонах заготовок навпроти стиків фазних секцій індуктора спостерігаються провали обох потужностей тепловиділення, які для кута  $\psi = 60$  ел. град. сягають у середньому приблизно 25 % від значень потужностей у регулярних фазних зонах, а для кута  $\psi = 120$  ел. град. вони доходять до 75 %.

Важливим питанням за такого розподілу потужності є розподіл температури в об'ємі заготовок залежно від системи

живлення трифазного індуктора. Як показали розрахунки, суттєва нерівномірність розподілу тепловиділень за довжиною заготовок, включаючи наявність провалів потужності в міжфазних зонах, завдяки високій теплопровідності металу слабо впливає на лінійність нагрівання алюмінієвих заготовок. Розподіл температури за довжиною заготовок у тришаровому трифазному індукторі практично нічим не відрізняється від розподілу температури в разі нагрівання заготовок в одношаровому трифазному індукторі, отриманому в попередній роботі [3]. За  $\psi = 60$  ел. град. температура за довжиною зростає практично лінійно, а за  $\psi = 120$  ел. град. на ділянках, де стикаються фазні секції індуктора, спостерігається незначна затримка у зростанні температури.

**Електричні втрати у витках багатшарових індукторів.** Як відомо, електричні втрати у витках лінійних багатшарових індукторів розподіляються по шарах і довжині індуктора нерівномірно, а тому важливо знати такий розподіл для кожного випадку, щоб правильно (раціонально) організувати охолодження індуктора водою (для водоохолоджуваних індукторів). Особливо це стосується індукторів галетного типу. У більшості наявних установок індукційного нагрівання, що мають велике струмове навантаження, водоохолоджуваний індуктор зазвичай розбивають на окремі секції, які електрично з'єднують між собою послідовно, а водою – паралельно.

У багатовиткових індукторах систем для нагрівання циліндричних зливків металу прийнято виділяти регулярну зону, в якій нормальна до поверхні індуктора складова напруженості магнітного поля мала, та крайові зони, де тангенціальні й нормальні напруженості співставні [7]. У загальному випадку втрати у витках цих зон різні. На рис. 5 показано розподіли довжиною втрат у витках однофазного одношарового індуктора типової установки для нагрівання циліндричних заготовок для пресування алюмінієвої катанки, число витків якого складає  $N = 154$ . Крива 1 на ньому відноситься до типового індуктора, намотаного «на ребро» рівнотовщинною мідною трубкою з поперечним перерізом  $12 \times 36$  мм (товщина стінок 2 мм), а крива 2 стосується також намотаного «на ребро» індуктора з оптимальним згідно з [3] профілем мідної трубки, яка має збільшену до 10 мм товщину ближньої до заготовки стінки з габаритними розмірами трубки  $12 \times 20$  мм. Звідси видно, що перехід однофазного одношарового індуктора на оптимальний профіль трубки дає змогу, з одного боку, зменшити втрати у витках, а з іншого – більш рівномірно завантажити витки індуктора за довжиною.

Аналогічні дослідження проводилося для однофазних і трифазних багатшарових індукторів галетного типу, які пропонується використати для такої установки. На рис. 6 наведе-

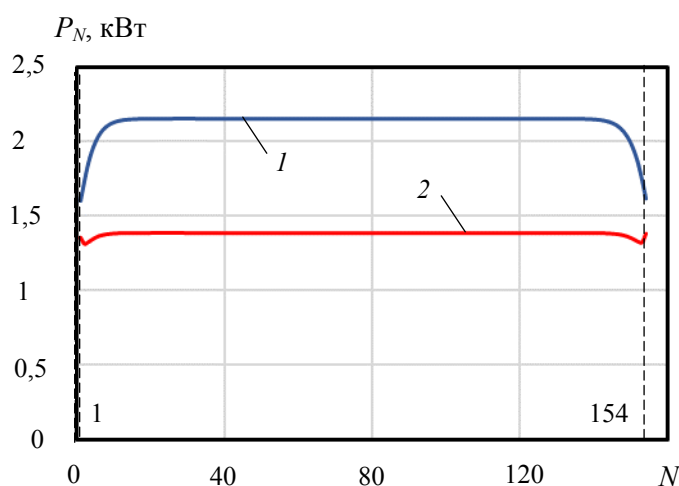


Рис. 5. Розподіли втрат у витках однофазного одношарового індуктора типової установки

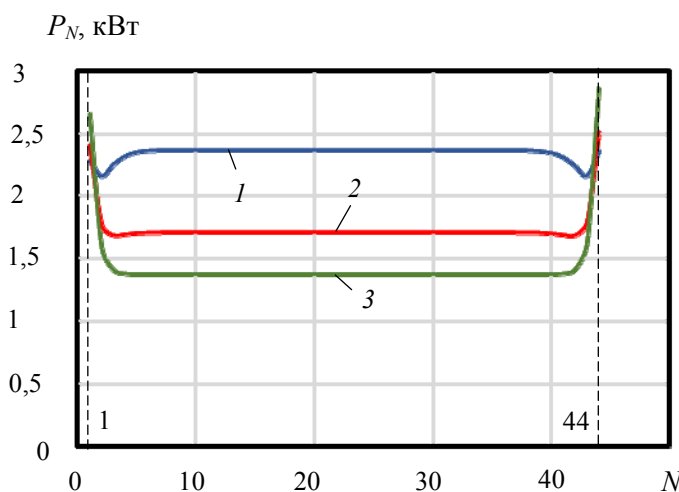
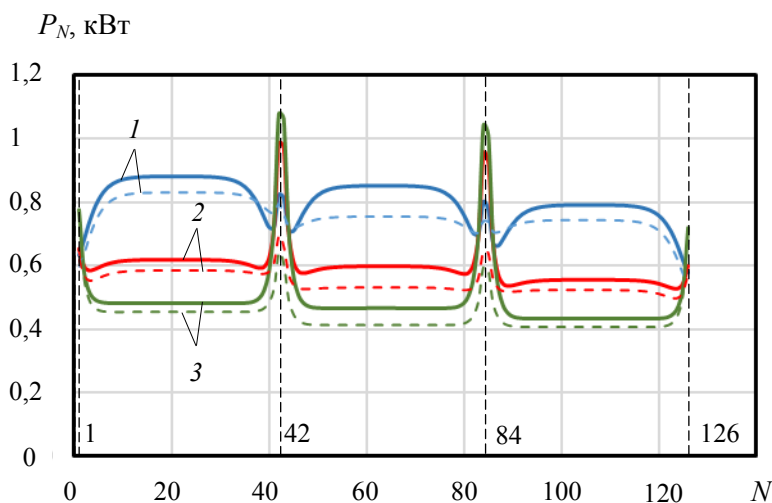


Рис. 6. Розподіли втрат потужності по витках і шарах однофазного тришарового індуктора

но розподіли втрат потужності по витках і шарах однофазного тришарового індуктора, електричні параметри якого представлено в табл. 2 ( $n = 3$ , з магнітопроводом). Загальна кількість витків цього індуктора складає  $N = 132$  (44 витка в кожному шарі). Крива 1 на цьому рисунку відноситься до внутрішнього (першого) шару, крива 2 – до середнього (другого), а крива 3 – до зовнішнього (третього) шару. Як і слід було очікувати, найбільші втрати у витках з приблизно рівномірним розподілом виникають у першому шарі, а найменші – у третьому. У другому і третьому шарах втрати в крайових зонах індуктора суттєво перевершують втрати в регулярній частині. Це призводить до того, що втрати в крайніх галетах індуктора, загальна кількість яких в індукторі становить 22 (6 витків у кожній галеті), більші ніж у галетах регулярної ділянки, що потрібно враховувати під час розбивки індуктора на окремі секції (паралельні гілки) охолодження.



**Рис. 7.** Розподіли втрат у витках і шарах трифазного індуктора для  $\psi = 120$  ел. град. (суцільні криві) і для  $\psi = 60$  ел. град. (пунктирні криві)

Моделювання електричних втрат у витках трифазних багатошарових індукторів галетного типу із загальною кількістю витків у кожній фазній секції  $N_s = 126$  (42 витка в кожному шарі) проводилося для кутів фазового зсуву між напругами сусідніх секцій  $\psi = 120$  і 60 ел. град. Результати цього моделювання показано на рис. 7, де наведено розподіли втрат по витках і шарах індуктора для  $\psi = 120$  ел. град. (суцільні криві) і для  $\psi = 60$  ел. град. (пунктирні криві). Нумерація кривих на цьому рисунку відповідає нумерації кривих на рис. 6.

Як впливає з цього рисунку, характер кривих розподілу втрат у витках регулярних ділянок кожної фазної секції трифазного індуктора такий самий, як і для однофазного індуктора. Найбільші втрати виникають у витках внутрішнього шару, а найменші – у зовнішньому шарі. Подібні розподіли втрат для обох індукторів спостерігаються й у крайових зонах. Особливим для трифазного індуктора є розподіл втрат на ділянках стика сусідніх фазних секцій. Якщо для внутрішнього шару (криві 1) втрати на цих ділянках співставні із втратами на регулярних ділянках для обох кутів  $\psi$ , то для двох інших шарів (криві 2 і 3) ці втрати більші втрат на регулярних ділянках. Водночас у випадку  $\psi = 120$  ел. град. максимальні втрати на ділянках стика виникають у витках зовнішнього шару, які суттєво (майже в 2 рази) перевершують втрати на регулярних ділянках, а мінімальні – у витках внутрішнього шару. Для  $\psi = 60$  ел. град. характер розподілу втрат на цих ділянках такий, як і для регулярних ділянок, тобто максимальні втрати виникають у витках внутрішнього шару, а мінімальні – у витках зовнішнього шару. Загалом втрати у витках індуктора за  $\psi = 60$  ел. град. менші ніж втрати за  $\psi = 120$  ел. град. Отриманий таким чином розподіл втрат у витках трифазного індуктора слід враховувати під час організації водяного охолодження такого індуктора.

**Висновки.** У результаті проведеного комп'ютерного моделювання електротеплових процесів у разі індукційного нагрівання циліндричних алюмінієвих зливків (заготовок) для пресування катанки показано, що при намотці прямокутною рівнотовщинною водоохолоджуваною мідною трубкою багатошарові індуктори індукційної установки мають більш високу енергоефективність відносно одношарових індукторів. Для типової установки, яка ви-



користується в технології пресування алюмінієвої катанки для отримання струмопровідних жил силових кабелів, визначено оптимальну кількість шарів індуктора, яка і для однофазного, і для трифазного виконання дорівнює трьом. Використання такого індуктора дає змогу в середньому на 20 % підвищити ККД наявної установки.

Для однофазного і трифазного тришарових індукторів визначено втрати у витках і їхній розподіл довжиною та шарами індукторів, що дає змогу раціонально організувати охолодження водою таких індукторів.

Для типової індукційної установки рекомендовано перехід із однофазного одношарового індуктора на трифазний тришаровий індуктор галетного типу з фазовим кутом між секціями у 60 ел. град., який дає змогу підвищити електричний ККД наявної установки з 39 до 48 %, а також вирівняти навантаження за фазами для трифазної мережі живлення.

*Роботу виконано за держбюджетною темою «Забезпечення стійкості та надійності національної електроенергетики в умовах синхронної роботи ОЕС України з континентальною європейською енергетичною системою ENTSO-E (шифр: РЕЖИМ-2)», № державної реєстрації 0123U100769), КПКБК 6541230.*

1. Золотарев В.М., Щерба М.А., Гуринов А.Г., Супруновская Н.И., Чопов Е.Ю., Обозный А.Л. Электротехнологический комплекс производства кабельных систем на напряжение до 400 кВ. К.: При формат. 2017. 594 с.
2. Шидловский А.К., Щерба А.А., Золотарев В.М., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Кабели с полимерной изоляцией на сверхвысокие напряжения. К.: Ин-т электродинамики НАН Украины. 2013. 550 с.
3. Жаркін А.Ф., Гориславец Ю.М., Глухенький О.І., Золотарьов В.В., Білянін Р.В. Моделирование электро-тепловых процессов в установке индукционной термообработки алюминиевых слитков и назначения путей повышения її эффективности при пресовании катанки для силовых кабелей. *Технічна електродинаміка*. 2023. № 6. С. 81–91.
4. Comsol Multiphysics, <https://www.comsol.com>
5. Злотников И.И., Захаров И.В. Повышение эффективности работы устройств для индукционного нагрева. *Вестник Гомельского Гос. Техн. Ун-та*. 2015. № 4. С. 53–58.
6. Harvey J.G. The theory of multy-layed windings for induction heating and their application to a 1 MW 50 Hz longitudinal flux billet heater. *VIII Congress UIE*. Liege. 1976. No 4. Pp.11a.
7. Немков В.С., Демидович В.Б. Теория и расчет устройств индукционного нагрева. Л.: Энергоатомиздат, 1988. 271 с.
8. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов. М.: Энергоатомиздат. 1986. 528 с.

## MULTILAYER INDUCTORS FOR INDUCTION HEAT TREATMENT INSTALLATION OF ALUMINUM CASTINGS WHEN PRESSING RODS FOR POWER CABLES

A.F. Zharkin<sup>1</sup>, Yu.M. Goryslavets<sup>1</sup>, O.I. Gluhenky<sup>1</sup>, R.V. Belyanin<sup>2</sup>

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

Beresteiskyi ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine

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

2 – YUZH CABLE WORKS, PJSC,

Avtogenna str., 7, Kharkiv, 61099, Ukraine

*On the basis of the developed mathematical model, computer (numerical) modeling of electrothermal processes in a multi-layer inductor installation, which is used for heating cylindrical aluminum ingots (blanks) before pressing the wire rod, as a basis for obtaining current-conducting cores of power cables from it, was carried out. Single-phase and three-phase multilayer inductors of the gallette type were studied, as a result of which it was shown that the maximum value of the electrical efficiency of such an installation for both inductors is provided by their three-layer winding with a water-cooled copper tube of rectangular section. For both inductors, distributions along the radius and length of the aluminum blanks of the volumetric specific power and the specific linear power of heat release from the eddy currents induced in the blanks were obtained. For a three-phase inductor, such distributions were obtained when feeding it with voltages with phase shift angles of 120 and 60 degrees. The losses in the turns of the inductors and their distribution along the length and layers of both inductors were also studied. Ref. 8, fig. 7, tables 2.*

**Key words:** electro-thermal processes, induction heat treatment, aluminum ingots, single-phase and three-phase multilayer inductors, computer modeling, efficiency of electro-heat treatment.

1. Zolotarev V.M., Shcherba M.A., Guryn A.G., Suprunovskaya N.Y., Chopov E.Yu., Obozny A.L. Electrotechnological complex for the production of cable systems for a voltage of up to 400 kV. K.: Pri format. 2017. 594 p. (Rus)
2. Shidlovsky A.K., Shcherba A.A., Zolotarev V.M., Podoltsev A.D., Kucheryavaya I.N. Cables with polymer insulation for ultra-high voltage. K.: Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine. 2013. 550 p. (Rus)
3. Zharkin A.F., Goryslavets Yu.M., Gluhenkyi O.I., Zolotaryov V.V., Bilyanin R.V. Modeling of electrothermal processes in the installation of induction heat treatment of aluminum ingots and determination of ways to increase its efficiency when pressing wire rod for power cables. *Tekhnichna Electrodynamika*. 2023. No. 6. Pp. 81–91. (Ukr)
4. Comsol Multiphysics, <https://www.comsol.com>
5. Zlotnikov I.Y., Zakharov I.V. Increasing the efficiency of induction heating devices. *Vestnik Gomelskogo Gosudarstvennogo Technicheskogo Universiteta*. 2015. No. 4. Pp. 53–58. (Rus)
6. Harvey J.G. The theory of multi-layered windings for induction heating and their application to a 1 MW 50 Hz longitudinal flux billet heater. *VIII Congress UIE*. Liege. 1976. No. 4. Pp.11a.
7. Nemkov V.S., Demidovych V.B. Theory and calculation of induction heating devices. L.: Energoatomizdat, 1988. 271 p. (Rus)
8. Tikhomirov P.M. Calculation of transformers. M.: Energoatomizdat. 1986. 528 p. (Rus)

Надійшла: 11.06.2024

Прийнята: 16.07.2024

Submitted: 11.06.2024

Accepted: 16.07.2024

**ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ КОМПЛЕКСИ ТА СИСТЕМИ**

УДК: 621.319.53

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2024.68.023>**МАТЕМАТИЧНА ТА КОМП'ЮТЕРНА МОДЕЛІ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З ФАЗНИМ РОТОРОМ У РЕЖИМІ ДИНАМІЧНОГО ГАЛЬМУВАННЯ З САМОЗБУДЖЕННЯМ**

**В.М. Шамардіна\***, канд.техн. наук, **К.О. Земцова\*\***,  
Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут",  
м. Харків, вул. Кирпичова, 2, 61002, Україна  
e-mail: [Kateryna.Zemtsova@ieee.khpi.edu.ua](mailto:Kateryna.Zemtsova@ieee.khpi.edu.ua)

Одним із важливих викликів сьогодення є забезпечення енергоефективності та покращення експлуатаційних характеристик найбільш поширених асинхронних електроприводів (АЕП) виробничих та підйомно-транспортних машин. Підвищення загального діапазону регулювання і стабільне регулювання швидкості в АЕП часто забезпечується застосуванням систем імпульсно-ключового або фазо-імпульсного регулювання частоти обертання асинхронного двигуна із фазним ротором, в яких регулювання здійснюється в колі випрямленого струму ротора. Наявність у таких схемах випрямляча напруги роторної обмотки створює умови для застосування режиму динамічного гальмування з самозбудженням (ДГС). У роботі запропоновано математичну модель асинхронного двигуна із фазним ротором у режимі ДГС у системі нерухомих відносно ротора осей координат  $(d, q)$  з урахуванням характеристики насиченості магнітної системи машини. Апробацію моделі проведено у процесі комп'ютерного моделювання із використанням можливостей пакету Simulink Matlab. Створена модель має практичну цінність, під час формування енергоефективних гальмівних режимів АЕП вона дасть змогу аналізувати складні електромагнітні перехідні процеси й обґрунтовано обирати структуру та параметри їхніх електричних схем. Бібл. 4, рис. 6.

**Ключові слова:** динамічне гальмування з самозбудженням, математична та комп'ютерна модель, вантажопідйомні механізми, енергоефективність.

**Актуальність роботи.** На сучасних вантажопідйомних машинах завдяки низці переваг найбільш поширеним є застосування асинхронних електроприводів (АЕП). Підйомно-транспортні механізми мають значні моменти інерції, тому в їхніх електроприводах можливий процес повернення частини кінетичної або потенційної енергії в мережу або використання її для формування гальмівних режимів. У системах АЕП за наявності в ланцюзі ротора випрямленого струму доцільним є використання режиму динамічного гальмування із самозбудженням [1], що дає змогу значно підвищити енергетичні показники електропривода (ЕП).

Схеми динамічного гальмування із самозбудженням (ДГС) характеризуються [1]:

- відсутністю вузлів підживлення, їхньою відносною простотою та невеликою вартістю;
- автоматичною залежністю струму збудження від навантаження електродвигуна, що забезпечує жорсткі характеристики привода і відносно високий діапазон регулювання швидкості;
- високими енергетичними показниками, так як електрична енергія з мережі практично не споживається.

У режимі ДГС здійснюється або зміна напрямку обертання двигуна в механізмах із активним характером статичного навантаження, або гальмування механізму тільки до зупинки (особливо за реактивного навантаження). При ДГС в обмотку статора асинхронного двигуна із фазним ротором (АД ФР) подається постійний струм, обумовлений випрямленою напругою випрямляча, що підключається до обмоток ротора. Застосування ДГС дає змогу підвищити швидкодію АЕП порівняно з іншими гальмівними режимами [2] або без втрат електричної енергії, або за незначного її споживання.





Під час удосконалення структур АЕП підйомних механізмів важливим завданням є підвищення їхньої енергоефективності, чому і сприяє використання режиму ДГС, тому актуальними є роботи зі створення математичних моделей, які враховують фактори впливу на формування цього режиму.

Метою роботи є побудова математичної моделі АД ФР у режимі ДГС з урахуванням характеристики насиченості магнітної системи машини з можливістю перевірки її адекватності шляхом комп'ютерного моделювання із використанням пакету Simulink Matlab.

У режимі ДГС значення динамічних параметрів АД ФР обумовлюються нелінійністю характеристики намагнічування, тобто ступенем насичення магнітної системи машини [1–4], що необхідно враховувати під час моделювання цього режиму. У розрахунках електроприводів вантажопідйомних механізмів доцільно використовувати узагальнену характеристику намагнічування, яка наведена в довідниках для кранових АД ФР, її аналітична залежність отримана за методом найменших квадратів:

$$x_{\mu} = 2\pi L_{\mu} = 0,0066 + \frac{1,2}{\sqrt{0,456 + I_{\mu}^2}}, \quad (1)$$

де  $x_{\mu} = 2\pi L_{\mu}$  – реактивний опір взаємної динамічної індуктивності від;  $I_{\mu}$  – струм намагнічування.

Відомо, що на результати комп'ютерного моделювання впливає вибір двофазної системи координат при математичному описі [4]. У режимі ДГС в АД ФР виникає електрична несиметрія в статорному колі, яка потребує використання системи нерухомих осей координат ( $\alpha, \beta$ ) відносно статора, і чергується несиметрія в колі ротора, що вимагає використання системи координат ( $d, q$ ). Наявність випрямляча в колі ротора обумовлює доцільність використання під час дослідження ДГС системи нерухомих осей координат ( $d, q$ ) відносно ротора. Надалі така модель буде корисною і під час досліджень АЕП з електричним зв'язком АД через коло випрямлених струмів роторів, електроприводів з машинами подвійного живлення.

У разі живлення обмоток статора двигуна від джерела напруги система електропривода має два зворотних зв'язка за ЕРС машини, що залежать від складових струму статора і потокозчеплення ротора. Тому під час розроблення моделі АД необхідно визначення сигналів:  $i_{sd}$  – струм статора за віссю  $d$ ;  $i_{sq}$  – струм ротора за віссю  $q$ ;  $\Psi_{rd}$  – потокозчеплення ротора за віссю  $d$ ;  $\Psi_{rq}$  – потокозчеплення ротора за віссю  $q$  [4].

Рівняння електричної рівноваги в системі координат ( $d, q$ ) набувають вигляду:

$$\begin{cases} U_{sd} = i_{sd} R_s + \frac{d\Psi_{sd}}{dt} - \omega_{ел} \Psi_{sq} \\ U_{sq} = i_{sq} R_s + \frac{d\Psi_{sq}}{dt} + \omega_{ел} \Psi_{sd} \\ U_{rd} = i_{rd} R'_r + \frac{d\Psi_{rd}}{dt} \\ U_{rq} = i_{rq} R'_r + \frac{d\Psi_{rq}}{dt} \end{cases}, \quad (2)$$

де  $U_{sd}, U_{sq}$  – напруги на обмотці статора двигуна відповідно по осях  $d, q$ ;  $R_s$  – опір обмотки статора;  $\omega_{ел}$  – електрична частота обертання ротора двигуна.

Електромагнітний момент двигуна  $M$  та електричну частоту обертання ротора  $\omega_{ел}$  можна описати системою:

$$\begin{aligned} M &= \frac{3}{2} Z_p (\Psi_{sd} i_{sq} - \Psi_{sq} i_{sd}); \\ J \frac{d\Omega}{dt} &= M - M_c; \\ \omega_{ел} &= Z_p \omega, \end{aligned} \quad (3)$$

де  $Z_p$  – кількість пар полюсів двигуна,  $\omega$  – механічна швидкість обертання ротора двигуна.

Треба враховувати, що на величину струмів обмоток ротора  $i_{rd}, i_{rq}$  та статора  $i_{sd}, i_{sq}$  двигуна впливають як власні індуктивності статора  $L_s$  і ротора  $L_r$ , так і взаємна їхня індукти-

вність  $L_\mu$  [4], це визначається за системою рівнянь (4).

Комп’ютерна модель АД ФР у пакеті Simulink Matlab, що створена на основі рівнянь (1) – (4), показана на рис. 1, де  $a$  – моделювання потокозчеплення обмотки ротора  $Y_{rd}, Y_{rq}$ ;  $b$  – моделювання потокозчеплення обмотки статора  $Y_{sd}, Y_{sq}$  і електрично-механічної частини АД ФР;  $c$  – моделювання струмів обмотки ротора  $i_{rd}, i_{rq}$  та обмотки статора  $i_{sd}, i_{sq}$ .

$$\begin{aligned}
 i_{sd} &= \frac{1}{L_s L_r - L_\mu^2} (\Psi_{sd} L_r - \Psi_{rd} L_\mu); \\
 i_{sq} &= \frac{1}{L_s L_r - L_\mu^2} (\Psi_{sq} L_r - \Psi_{rq} L_\mu); \\
 i_{rd} &= \frac{1}{L_s L_r - L_\mu^2} (\Psi_{rd} L_r - \Psi_{sd} L_\mu); \\
 i_{rq} &= \frac{1}{L_s L_r - L_\mu^2} (\Psi_{rq} L_r - \Psi_{sq} L_\mu); \\
 i_\mu &= \sqrt{(i_{sd} + i_{rd})^2 + (i_{sq} + i_{rq})^2}.
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

Перехідний процес зміни струму намагнічування двигуна  $i_\mu$  за рівняннями (4) під час розгону двигуна та переходу в режим ДГС зображено на рис.2.

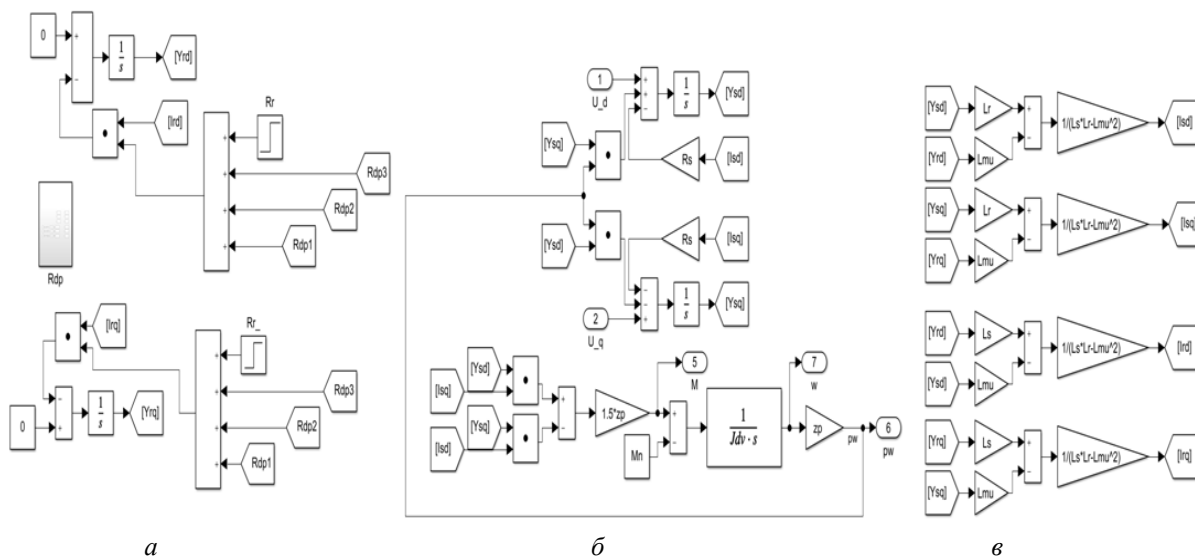
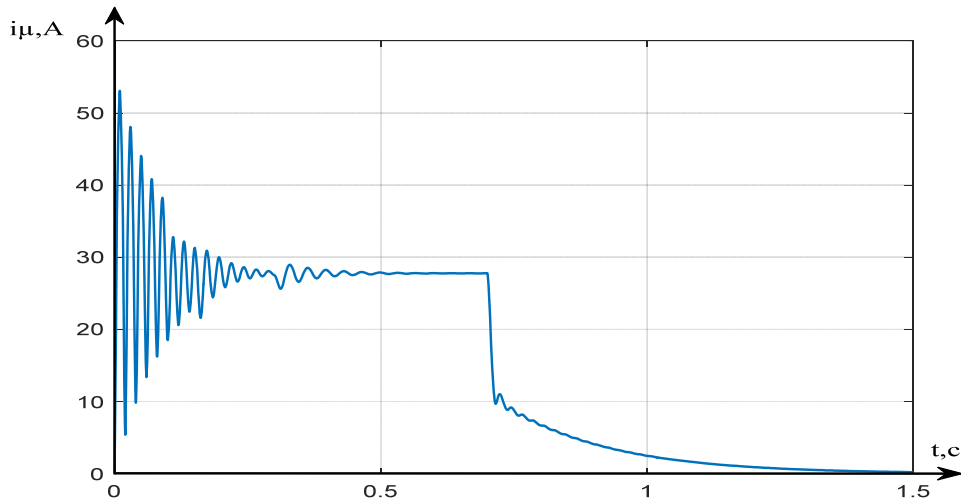


Рис. 1. Комп’ютерна модель асинхронного двигуна із фазним ротором у пакеті Simulink Matlab

Окремим етапом є побудова імітаційної моделі реалізації режиму ДГС, в якому для створення постійного струму збудження в статорі АД ФР використовують випрямлену ЕРС, що індукується в роторі. Початкову напругу збудження АД можна створити за допомогою додаткового малопотужного випрямляча, до якого підключаються обмотки статора. Недолік цього способу полягає в тому, що необхідно мати зовнішнє джерело живлення, але потужність його незначна.

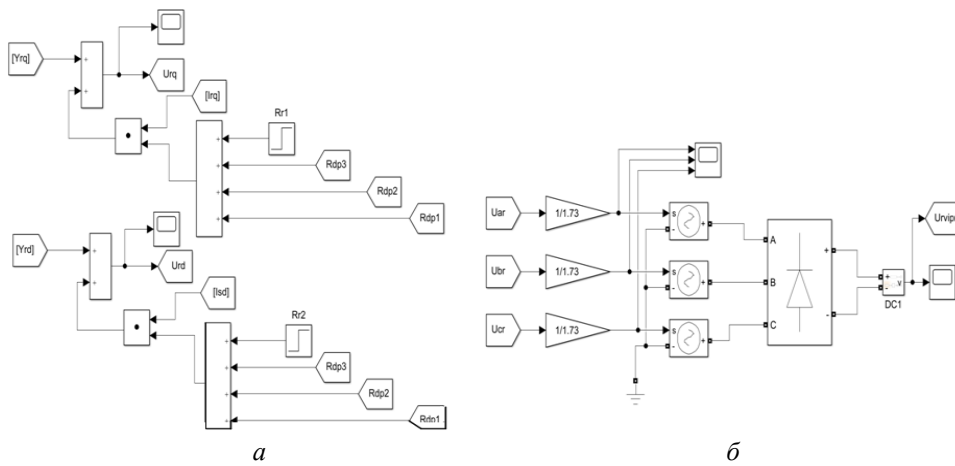
Під час математичного моделювання безпосередньо режиму ДГС необхідно створити блок випрямлення напруги ротора та визначення моменту її подачі на обмотку статора для початку процесу гальмування. Схема комп’ютерної моделі дає змогу визначити складові напруги на роторі  $U_{rd}, U_{rq}$  за рівнянням (2), що показано на рис. 3 а, а потім за допомогою блоку Universal Bridge у пакеті Simscape Matlab [4] випрямити їх, що показано на рис. 3 б.

Далі, відповідно до системи рівнянь (2), використовуємо вже випрямлену напругу ротора, у результаті отримаємо математичну модель двигуна в режимі ДГС у вигляді системи



**Рис. 2.** Перехідний процес зміни струму намагнічування двигуна  $i_{\mu}$  за рівняннями (4) під час розгону двигуна та переходу в режим динамічного гальмування із самозбудженням

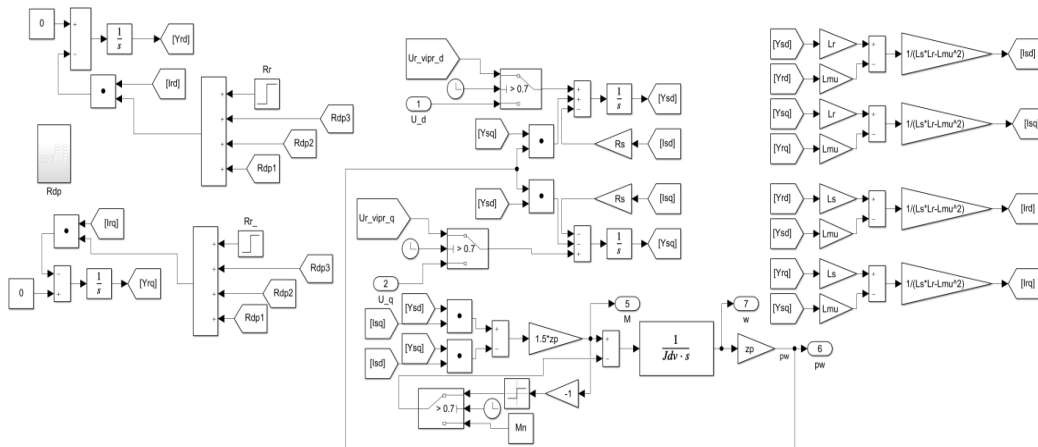
диференціальних рівнянь (5), за цією математичною моделлю створено комп'ютерну модель АДФР у режимі ДГС у пакеті Simulink Matlab, що показана на рис. 4.



**Рис. 3.** Схема комп'ютерної моделі режиму динамічного гальмування із самозбудженням:  
 а – визначення складових напруги обмотки ротора  $U_{rd}$ ,  $U_{rq}$ ;  
 б – визначення складових напруги обмотки ротора  $U_{rd}$ ,  $U_{rq}$  за допомогою блоку Universal Bridge

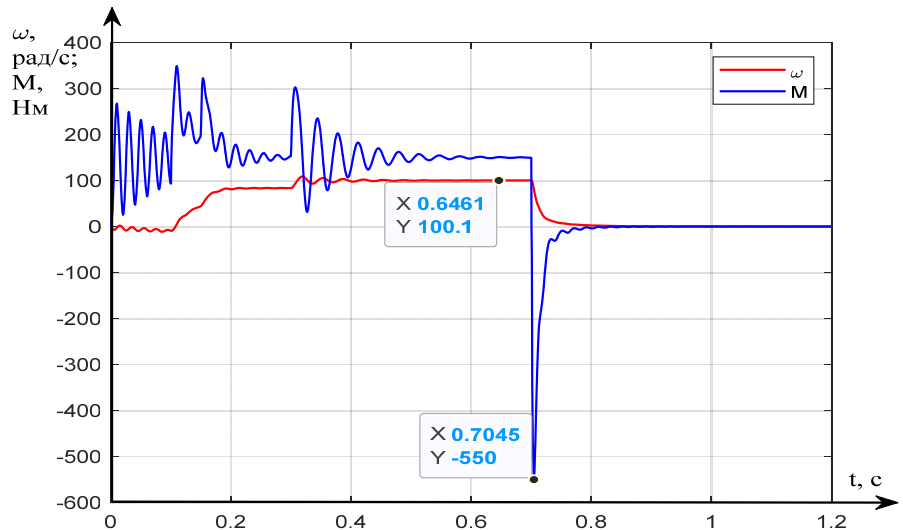
$$\begin{cases}
 U_{rd\text{unp.}} = i_{sd} R_s + \frac{d \Psi_{sd}}{dt} - \omega_{\text{ел}} \Psi_{sq} \\
 U_{rq\text{unp.}} = i_{sq} R_s + \frac{d \Psi_{sq}}{dt} + \omega_{\text{ел}} \Psi_{sd} \\
 U_{rd} = i_{rd} R'_r + \frac{d \Psi_{rd}}{dt} \\
 U_{rq} = i_{rq} R'_r + \frac{d \Psi_{rq}}{dt} \\
 M = \frac{3}{2} Z_p (\Psi_{sd} i_{sq} - \Psi_{sq} i_{sd}) \\
 J \frac{d \Omega}{dt} = M - M_c \\
 \omega_{\text{ел}} = Z_p \omega
 \end{cases} \quad (5)$$

де  $U_{rd\text{випр.}}$  – випрямлена напруга обмотки ротора двигуна за віссю  $d$ ;  $U_{rq\text{випр.}}$  – випрямлена напруга обмотки ротора двигуна за віссю  $q$ .



**Рис. 4.** Комп’ютерна модель асинхронного двигуна із фазним ротором у режимі динамічного гальмування із самозбудженням у пакеті Simulink Matlab

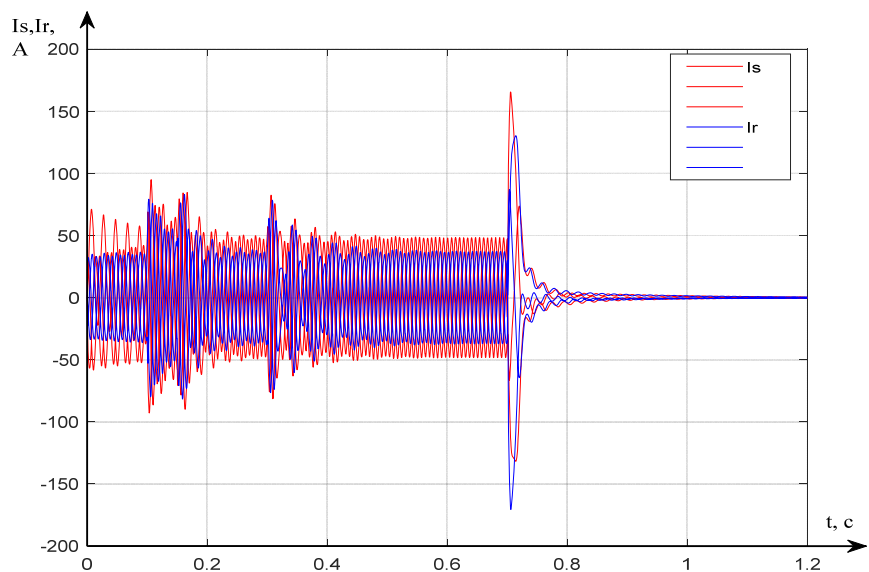
На рис. 5 наведено графіки перехідних процесів швидкості  $\omega$  і електромагнітного моменту двигуна  $M$ , на рис. 6 – струмів ротора  $I_r$  і статора  $I_s$ . У разі переходу в режим ДГС спостерігається значний стрибок електромагнітного моменту двигуна  $M$ , його величину можна обмежити шляхом зменшення напруги, яка подається на статорні обмотки з виходу потенціометра, що підключається до виходу випрямляча в роторі.



**Рис. 5.** Графіки перехідних процесів швидкості  $\omega$  і електромагнітного моменту двигуна  $M$

**Висновки.** 1. У системі нерухомих осей координат  $(d, q)$  створено математичну модель АД ФР у режимі ДГС за врахування насиченості магнітної системи двигуна, на базі якої побудовано комп’ютерну модель із використанням можливостей пакету Simulink Matlab.

2. Виконано апробацію отриманої моделі під час дослідження пуску АД ФР та гальмування в режимі ДГС, адекватність моделі підтверджено у зі-



**Рис. 6.** Графіки перехідних процесів струмів ротора  $I_r$  і статора  $I_s$

ставленні із результатами раніш проведених досліджень статичних характеристик двигуна МТФ 312-6 у режимі ДГС.

3. Запропоновані моделі мають практичну цінність, під час формування енергоефективних гальмівних режимів АЕП вони дають змогу аналізувати складні електромагнітні перехідні процеси й обґрунтовано обирати структуру та параметри їхніх електричних схем.

1. Шамардіна В.М., Земцова К.О. Визначення області самозбудження асинхронного двигуна у багатодвигунному електроприводі. *Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит*. 2023. № 9–10 (187–188). С. 78–92. DOI: <http://eee.khpi.edu.ua/issue/view/17718>
2. Ir. Muhaimin, M.T Dynamic Breaking Application of Three Phase Induction Motor using PLC. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Indonesia. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/536/1/012097>
3. Кулагін Д.О. Визначення динамічних індуктивностей асинхронного двигуна з урахуванням процесів насичення. *Електротехніка та електроенергетика*. 2014. № 1. С. 55–60
4. Чорний О.П., Толочко О.І., Титюк В.К., Родькін Д.Й., Чекавський Г.С. Математичні моделі та особливості чисельних розрахунків динаміки електроприводів з асинхронними двигунами: монографія. Кременчук: ПП Шчербатих О.В., 2016. 302 с.

#### MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELS OF AN INDUCTION MOTOR WITH A PHASEROTOR IN THE MODE OF DYNAMIC BRAKING WITH SELF-EXCITATION

**V.M. Shamardina, K.O. Zemtsova,**

National Technical University Kharkiv Polytechnic Institute,

Kharkiv, Ukraine; 2 Курпучова ст., 61002

e-mail: [Kateryna.Zemtsova@ieee.khpi.edu.ua](mailto:Kateryna.Zemtsova@ieee.khpi.edu.ua)

*One of the important challenges of today is to ensure energy efficiency and improve the performance of the most common induction electric drives (IEDs) for production and lifting and handling machines. Increasing the overall control range and stable speed control in AEDs is often ensured by the use of pulse-key or phase-pulse control systems for the speed of rotation of the AD FR, in which the control is carried out in the rectified rotor current circuit. The presence in such schemes of a rotor winding voltage rectifier creates conditions for the use of the dynamic self-excitation braking (DSB) mode. The paper proposes a mathematical model of the AD FR in the DBS mode in the system of coordinate axes (d, q) fixed relative to the rotor, taking into account the saturation characteristics of the magnetic system of the machine. The model was tested by computer simulation using the capabilities of the Simulink Matlab package. The created model is of practical value; in the formation of energy-efficient braking modes of AEPs, it will allow analysing complex electromagnetic transients and reasonably choosing the structure and parameters of their electrical circuits. Ref. 4, fig. 6.*

**Keywords:** dynamic braking with self-excitation, mathematical and computer model, lifting mechanisms, energy efficiency.

1. Shamardina V.M., Zemtsova K.O. Determination of the self-excitation region of an induction motor in a multi-motor electric drive. *Enerhozberzhennia. Enerhetyka. Enerhoaudyt*. 2023. No 9–10 (187–188). Pp. 78–92. DOI: <http://eee.khpi.edu.ua/issue/view/17718> (Ukr)
2. Ir. Muhaimin, M.T Dynamic Breaking Application of Three Phase Induction Motor using PLC. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Indonesia. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/536/1/012097>
3. Kulagin D. Definition of dynamic inductances of the asynchronous engine with regard to processes of saturation. *Elektrotehnika ta elektroenerhetyka*. 2014. No 1. Pp. 55–60. (Ukr)
4. Chorny O., Tolochko O., Tytyuk V., Rodkin D., Chekavskiy G. Mathematical models and specifics of numerical calculations of dynamic characteristics of electric drives with induction motors: monograph. Kremen-chuk: PE Shcherbatykh O.V., 2016. 302 p. (Ukr)

Надійшла: 13.05.2024

Прийнята: 05.07.2024

Submitted: 13.05.2024

Accepted: 05.07.2024

УДК 621.314.621

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2024.68.029>

## УДОСКОНАЛЕННЯ ЗАСОБІВ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В СУДНОВИХ ЕЕС З НАПІВПРОВІДНИКОВИМИ ПРОПУЛЬСИВНИМИ КОМПЛЕКСАМИ

Д.О. Жук\*, канд. техн. наук, О.К. Жук\*\*, канд. техн. наук, М.О. Козлов\*\*\*

Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова,

пр. Героїв України, 9, Миколаїв, 54025, Україна

e-mail: [dmytro.zhuk@nuos.edu.ua](mailto:dmytro.zhuk@nuos.edu.ua)

*Розглянуто можливі напрямки удосконалення засобів забезпечення якості електроенергії (ЯЕ) з метою підвищення їхньої ефективності з урахуванням схемних і режимних особливостей інтегрованих суднових електроенергетичних систем (СЕЕС) з напівпровідниковими пропульсивними комплексами (НПК). Запропоновано та досліджено одно- та дволанковий варіанти системних керованих фільтрокомпенсуючих пристроїв (КФКП), призначених для одночасної повної компенсації реактивної потужності (РП), а також суттєвого послаблення гармонічних спотворень напруги і струму в СЕЕС з НПК. Реалізовано підхід до моделювання, який дає змогу порівняти вплив запропонованих КФКП на інтегральний коефіцієнт гармонічних спотворень напруги в системах з різними типами вхідних випрямлячів у складі перетворювачів частоти (ПЧ) НПК з урахуванням можливого відхилення частоти суднової мережі. Бібл. 7, рис. 7, таблиця.*

**Ключові слова:** якість електроенергії, суднова електроенергетична система, судновий напівпровідниковий пропульсивний комплекс, перетворювач частоти, керований фільтрокомпенсуючий пристрій.

**Вступ.** Проблема якості електроенергії (ЯЕ) в електроенергетичних системах автономних морських об'єктів, насамперед, для суден з потужними напівпровідниковими комплексами та єдиною інтегрованою судною електроенергетичною системою (СЕЕС) залишається вельми актуальною через вплив ЯЕ на умови експлуатації і безпеку судна в цілому. У морській галузі широко відомі інциденти з катастрофічними наслідками, що трапилися через низьку ЯЕ, такі як аварії на пасажирському круїзному лайнері RMC «Queen Mary 2» (вихід з ладу конденсатора в кормовому приміщенні фільтра гармонік та вибух в кормовому головному розподільному щиті; тимчасова втрата судном маневреності) [1–3], на пасажирському судні MC «Statendam» (спалах дуги в головному вимикачі та пожежа в приміщенні головного розподільного щита) [1] та на нафтовій платформі «Tern Alpha» (вибух в газокompресійному модулі, пожежа, евакуація персоналу, зупинка процесу буріння) [1].

Короткий перелік найбільш актуальних для СЕЕС показників ЯЕ з відповідними нормами, що прийняті органами ІЕЕЕ та ІЕС, а також класифікаційними товариствами ABS та PRS [2], наведено в табл.1. Ці показники охоплюють:  $\delta f_p$ ,  $\delta f_{tr}$ ,  $\delta f_{per}$ ,  $\delta f_{max}$  – стале, перехідне, періодичне, максимальне відхилення частоти відповідно;  $\delta U_p$ ,  $\delta U_{tr}$ ,  $\delta U_{per}$ ,  $\delta U_{max}$  – стале, перехідне, періодичне, максимальне відхилення напруги відповідно;  $K_U$  (THD) – інтегральний коефіцієнт гармонічних спотворень напруги;  $K_{U(v)}$  – коефіцієнт  $v$ -ї гармоніки напруги;  $\delta P$ ,  $\delta Q$  – коефіцієнти відхилень пропорційності розподілу активної та реактивної потужності.

Інтегровані ЕЕС суден та морських платформ з пропульсивними комплексами мають спільні особливості, які ускладнюють задачу забезпечення ЯЕ:

1. На відміну від сухопутної суднова електрична мережа є автономною та гнучкою енергетичною системою. Її генеруюча здатність заздалегідь точно визначена і обмежена.
2. Потужність КЗ СЕЕС є значно меншою, а її еквівалентний опір є відносно більшим порівняно з промисловими мережами.
3. Потужність окремих навантажень СЕЕС сумірна з потужністю окремої генераторної установки.
4. Морські умови є дуже мінливими, що призводить до незапланованого ступінчастого змінювання активного та реактивного навантаження, напруги, частоти та рівня гармонік суднової мережі.



5. СЕЕС можна розглядати як систему змінюваної частоти та напруги з довгостроковими (сталими) або швидкоплинними (короткочасними, перехідними) значеннями відповідних параметрів [2].

6. Паралельна робота множинних генераторів потребує керування розподілом активної та реактивної потужності.

Показник	Значення показника			
	IEEE - 45	PN-IEC6100 92-101	ABS	PRS
$\delta f_p$	$\pm 3\%$	$\pm 5\%$	$\pm 5\%$	$\pm 5\%$
$\delta f_{tr}$				
а) значення	$\pm 4\%$	$\pm 10\%$	$\pm 10\%$	$\pm 10\%$
б) тривалість	2с	5с	5с	5с
$\delta U_{per}$	0,5%	0,5%	–	–
$\delta U_{max}$	5,5%	12,5%	–	–
$\delta U_p$	$\pm 5\%$	6% – 10%	+6% – 10%	+6% – 10%
$\delta U_{tr}$				
а) значення	$\pm 16\%$	$\pm 20\%$	$\pm 20\%$	$\pm 20\%$
б) тривалість	2с	1,5с	1,5с	1,5с
$\delta U_{per}$	5%	2%	–	–
$\delta U_{max}$	$\pm 20\%$	$\pm 20\%$	–	–
$K_U$ (THD)	5%	5%	5%	7,5%
$K_{U(v)}$	3%	3%	3%	4,5%
Стрибки напруги	2500В ( $U_{ном}=380-600В$ )	5,5 $U_{ном}$	$\delta f_{max}$	–
$u_s$ , $t_{нар}/t_{сп}$	1000В ( $U_{ном}=380-600В$ )	1,2μс/50μс		
$\delta P$	–	–	$\pm 15\%$	$\pm 15\%$
$\delta Q$	–	–	$\pm 10\%$	$\pm 10\%$

**Метою роботи** є удосконалення суднових загальносистемних засобів забезпечення ЯЕ шляхом досягнення їх багатofункціональності, керованості та ефективності щодо показників за основним призначенням при інваріантності або слабкій чутливості до впливу інших, ускладнюючих рішення цієї задачі, показників.

**Матеріал досліджень.** Типовий пропульсивний (руховий) або підрулюючий комплекс на сучасних суднах змінного струму має за основу перетворювачі частоти (ПЧ), здебільшого з проміжною ланкою постійного струму, отримані через комбінацію випрямляч-автономний інвертор, наприклад інвертор напруги (АІН) з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ) при роботі на асинхронний двигун (АД) або інвертор струму (АІС), з комутацією навантаженням – синхронним двигуном (СД) (рис. 1). Таким чином, напівпровідниковий пропульсивний комплекс (НПК) впливає на якість електроенергії в СЕЕС саме через вхідний випрямляч ПЧ.

Результати аналізу досліджень із зазначеної тематики [2–5] визначають два основних напрямки вирішення проблеми ЯЕ в суднових ЕЕС з потужними НПК: 1. Застосування удосконалених схемотехнічних рішень вхідних випрямлячів у складі НПК з метою мінімізації генерованих ними в мережу неактивних складових потужності: реактивної та спотворення; 2. Створення та удосконалення ефективних керованих мережевих засобів зменшення гармонік та компенсації реактивної потужності (фільтрокомпенсуючих пристроїв), що відповідають специфічним вимогам та умовам функціонування СЕЕС з потужними НПК.

Реалізація першого напрямку пов'язана з широким використанням на вході потужних ПЧ: а) 12-пульсних тиристорних керованих випрямлячів (КВ) разом з фазозсувними трансформаторами [3, 4] (рис.1 а); б) діодних некерованих випрямлячів (НВ), у тому числі з підвищеною пульсністю (рис. 1 б, в) [4, 5]; в) активних випрямлячів (АВ) АFE з високочастотною ШІМ (рис.1 з) [2, 4].

КВ створюють високий рівень гармонічних спотворень в низькочастотній області спектру 50Гц – 2,5 кГц, а також споживають значну РП, яка вимагає керованої компенсації.



АВ генерують в діапазоні від 2,5кГц до 10кГц високочастотні спотворення, які спричиняють значно серйозніші наслідки, ніж низькочастотні [5]. Слід зазначити, що саме через цю причину світові виробники засобів забезпечення ЯЕ в морській галузі останнім часом відмовляються від використання активних випрямлячів з високочастотною ШІМ в частотнорегульованих пропульсивних приводах [5]. З цієї ж причини вони уникають використання силових активних фільтрів в СЕЕС з НПК [5].

Аналіз проблем, напрямків та результатів удосконалення сучасних засобів забезпечення ЯЕ в СЕЕС з НПК з врахуванням реалій морської практики свідчить, що стратегічна лінія провідних світових виробників і науковців полягає в прийнятті комплексних рішень, які поєднують використання традиційних багатопульсних діодних вхідних випрямлячів ПЧ та інноваційних фільтрокомпенсуючих пристроїв, які мають бути загальносистемними, керованими, такими, що ефективно повністю компенсують реактивну потужність та значно послаблюють рівень спотворень напруги і струму мережі в діапазоні 50Гц...2,5 кГц, а також не створюють додаткових високочастотних спотворень у діапазоні 2,5...10 кГц та зберігають ефективність при відхиленнях частоти суднової мережі  $\pm 10\%$  в сталих та перехідних режимах.

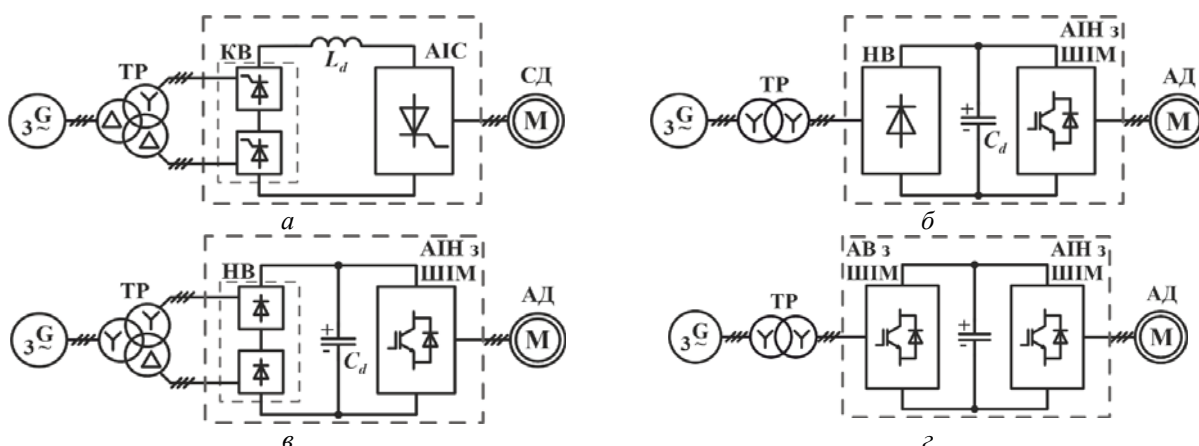


Рис. 1. Основні структури перетворювачів частоти, які використовуються в сучасних суднових НПК за типами вхідних перетворювачів: а – з 12-пульсним КВ та АІС ; б – з 6-пульсним НВ та АІН з ШІМ ; в – з 12-пульсним НВ та АІН з ШІМ ; г – з АВ та АІН з ШІМ

Наприклад, таким вимогам відповідає одноланковий керований фільтрокомпенсуючий пристрій (КФКП), запропонований і розглянутий в [6, 7], який вдало поєднує функції одночасної керованої повної компенсації реактивної потужності в СЕЕС, незалежно від причин і джерел, що її породжують, а також суттєвого зниження гармонічних спотворень від впливу НПК без виникнення резонансних явищ. КФКП як керований компенсатор неактивних складових потужності, створюваних НПК, має також зменшувати сталі та перехідні відхилення напруги мережі за умови можливих відхилень частоти. Структурно-функціональні схеми системи синхронний

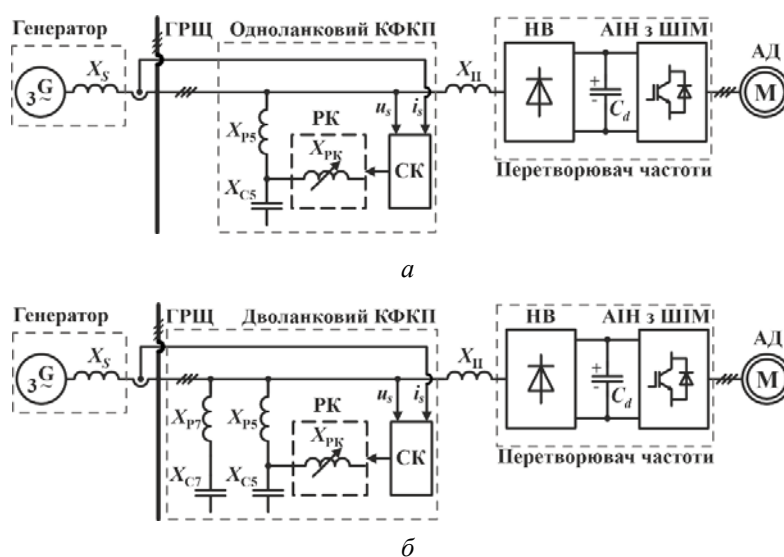


Рис. 2. Схеми підключення одно- (а) та дволанкового (б) КФКП до системи «СГ – ПЧ»



генератор – перетворювач частоти (СГ – ПЧ) з одно- та дволанковим КФКП показані на рис. 2.

Одноланковий КФКП (рис. 2, а) містить силовий резонансний фільтр (РФ), налаштований на гармоніку найнижчого порядку, генеровану в мережу вхідним випрямлячем, та керований реакторний компенсатор (РК) з широтно-імпульсним регулюванням (ШІР). Він виконує подвійну функцію: усуває з напруги СЕЕС гармоніку налаштування РФ разом з послабленням інших вищих гармонік, а також спільно з РК здійснює повну керовану компенсацію РП, враховуючи в балансі дію всіх елементів СЕЕС, включаючи сам КФКП. У дволанковому КФКП (рис. 2, б) перша ланка така ж, як і в одноланковому. Друга некерована резонансна ланка – є резонансним фільтром, що усуває зі спектрів напруги і струму мережі гармоніку наступного порядку, а також сприяє послабленню інших гармонік більш високих порядків. Вона є додатковим джерелом нерегульованої реактивної потужності, яка також компенсується.

Розрахунок КФКП передбачає виконання умов балансу реактивної потужності в системі та обмеження  $K_U$  [6]. При правильному виборі параметрів РФ ( $X_{R\Phi}$  і  $X_{C\Phi}$ ) для збереження його ефективності при гранично допустимому сталому відхиленні частоти СЕЕС  $\delta f_p = \pm 5\%$  [2], необхідно враховувати додаткову умову  $X_{R\Phi} \leq 0,5X_S$ .

Структурно-функціональна реалізація в MATLAB одно- та дволанкових КФКП, як складових моделей досліджуваних систем з НПК на базі пропульсивних електроприводів з ПЧ у варіантах з вхідними 6-пульсними або 12-пульсними (некерованими або керованими) випрямлячами, представлені на рис. 3 а, б.

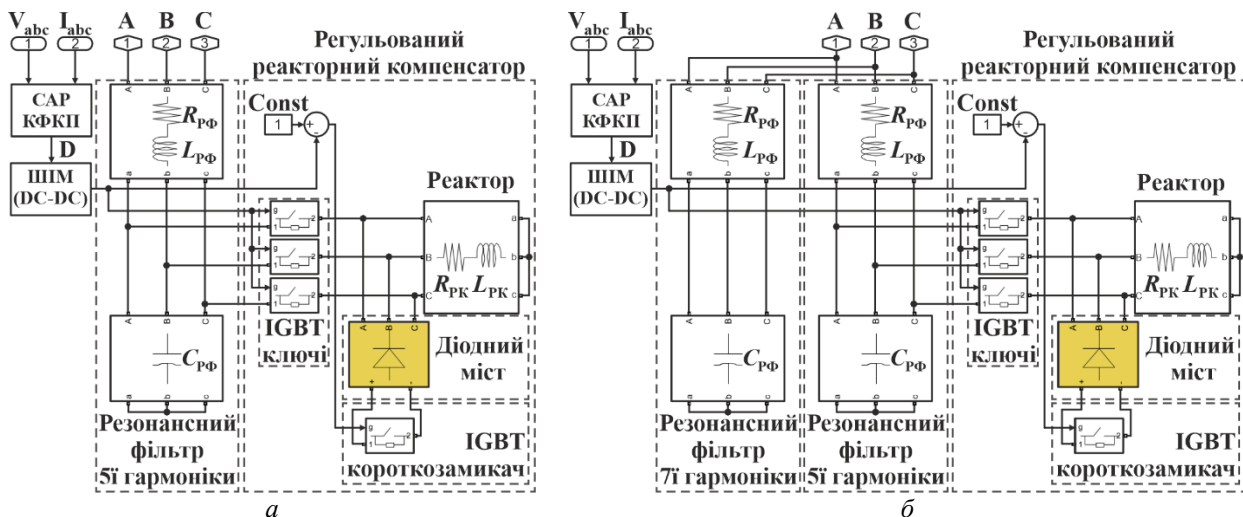
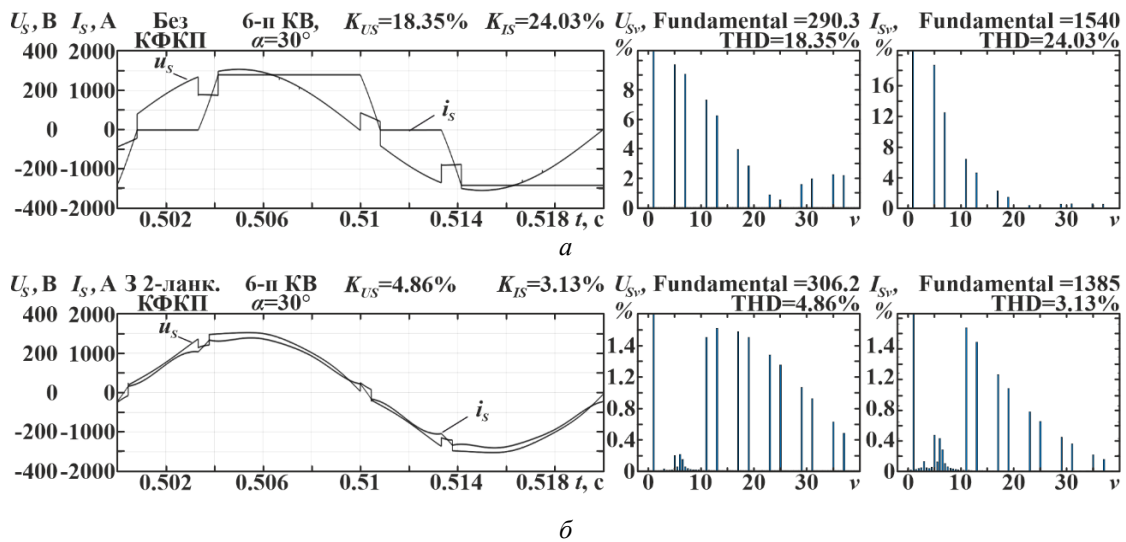


Рис. 3. MATLAB-моделі одно- (а) та дволанкового (б) КФКП

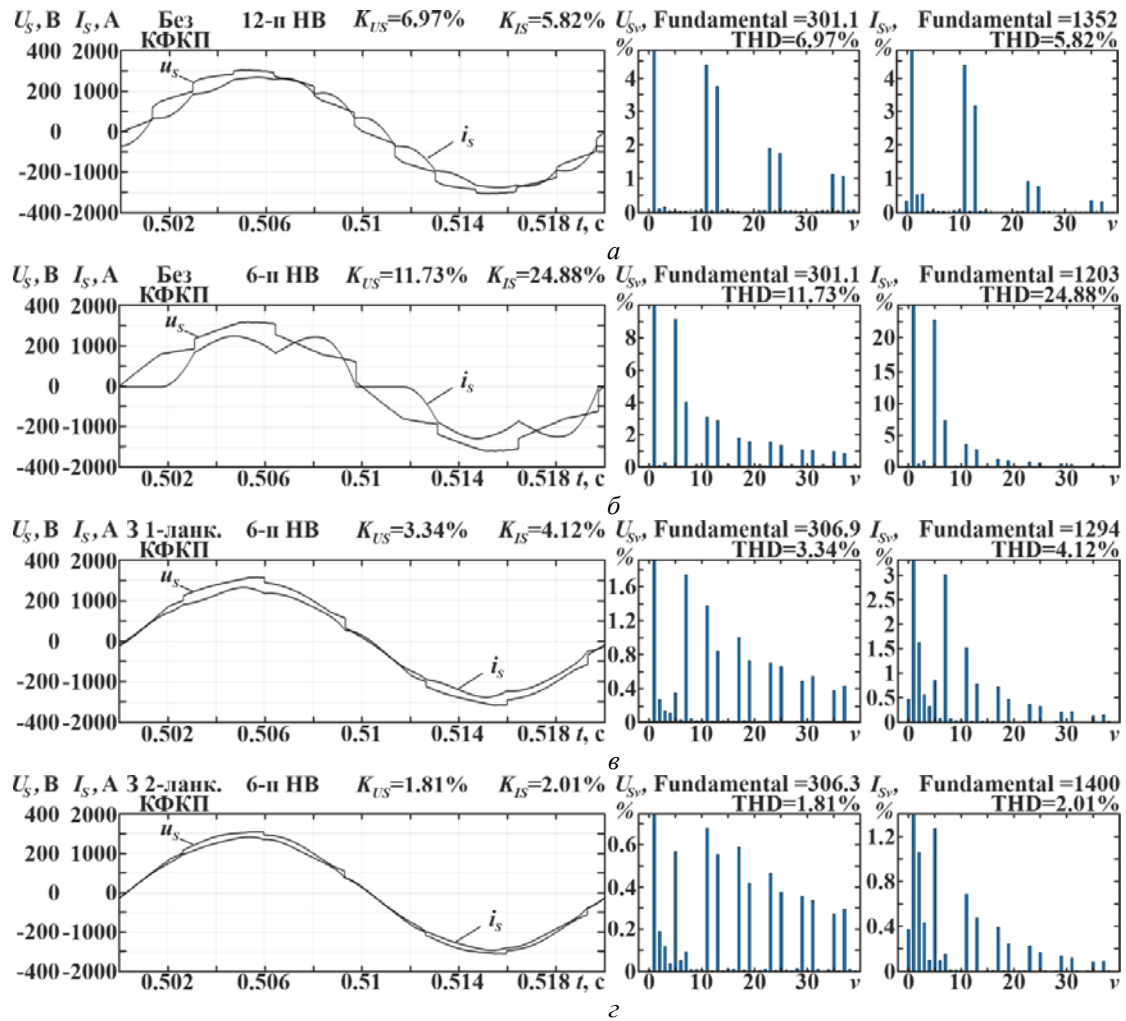
З метою перевірки ефективності запропонованих одно- та дволанкових КФКП та методи визначення їхніх параметрів виконано порівняльне дослідження рівнів коефіцієнтів спотворення напруги і струму мережі за результатами моделювання системи СГ – ПЧ при різних типах, конфігураціях та поєднаннях КФКП і вхідних випрямлячів у складі ПЧ в умовах змінювання частоти генератора. Щоб результати моделювання були зіставними, параметри моделі кожної системи визначено, виходячи з умови однакового співвідношення активної потужності генератора і перетворювача частоти:  $P_{СГ} = 1000$  кВт;  $P_{ПЧ} = 600$  кВт.

На рис. 4 представлено результати моделювання для СЕЕС з НПК на базі ПЧ з вхідним 6-пульсним тиристорним КВ без КФКП та при його підключенні.

Таким чином, як свідчать результати моделювання, комплекс «одномостовий КВ – дволанковий КФКП» по відношенню до суднової мережі діє подібно до двомостового 12-пульсного КВ з усуненням 5- та 7-ї гармонік без застосування додаткового триобмоткового фазозсувного трансформатора та випрямного моста, виконуючи ще й повну керовану компенсацію реактивної потужності, а також зменшення  $K_U$  від 18,35 до 4,86 %.



**Рис. 4.** Результати моделювання напруги і струму в часовій області, їхні спектри і величини коефіцієнтів спотворень  $K_U, K_I$  в мережі СЕЕС з НПК на базі ПЧ з вхідним 6-пульсним тиристорним КВ при куті керування  $\alpha = 30^\circ$  і фіксованій частоті мережі 50 Гц: *а* – без КФКП; *б* – з дволанковим КФКП



**Рис. 5.** Результати моделювання напруги і струму в часовій області, їхні спектри і величини коефіцієнтів спотворень  $K_U, K_I$  в мережі СЕЕС з НПК на базі ПЧ: *а, б* – з вхідними 12-пульсним і 6-пульсним НВ без КФКП; *в, г* – з вхідним 6-пульсним НВ відповідно при підключених одно- і дволанкового КФКП

На рис. 5 представлено результати моделювання для СЕЕС з НПК на базі ПЧ з вхідними 12-ти і 6-пульсним НВ без КФКП; з 6-пульсним НВ за наявності одно- або дволанкового КФКП.

Отже, модельний експеримент свідчить, що заміна дорогої 12-пульсної двомостової схеми НВ з триобмотковим трансформатором 6-пульсним одномостовим НВ у поєднанні з дволанковим КФКП, налаштованим на 5- та 7-у гармоніки, дає змогу послабити  $K_U$  від 11,73 до 1,81 %. Цю корисну властивість дволанкового КФКП зафіксовано вперше.

За результатами моделювання на рис. 6 побудовані залежності  $K_U$  від відхилень частоти мережі в діапазоні  $f = (50 \pm 10)$  Гц для систем з одно- та дволанковими КФКП при варіантах 6- і 12-пульсного вхідного КВ та 6- і 12-пульсного вхідного НВ у складі ПЧ НПК. Представлені результати дозволяють виявити наступні закономірності:

1. Частотні залежності  $K_U$  для систем з одноланковими КФКП мають майже монотонний характер з незначним збільшенням  $K_U$  при зростанні частоти.
2. Для систем з дволанковими КФКП графіки зазначених залежностей мають явно виражену область увігнутості, околі фіксованої частоти 50 Гц, на краях якої (зліва і справа) спостерігаються різкі пікові зростання  $K_U$ .

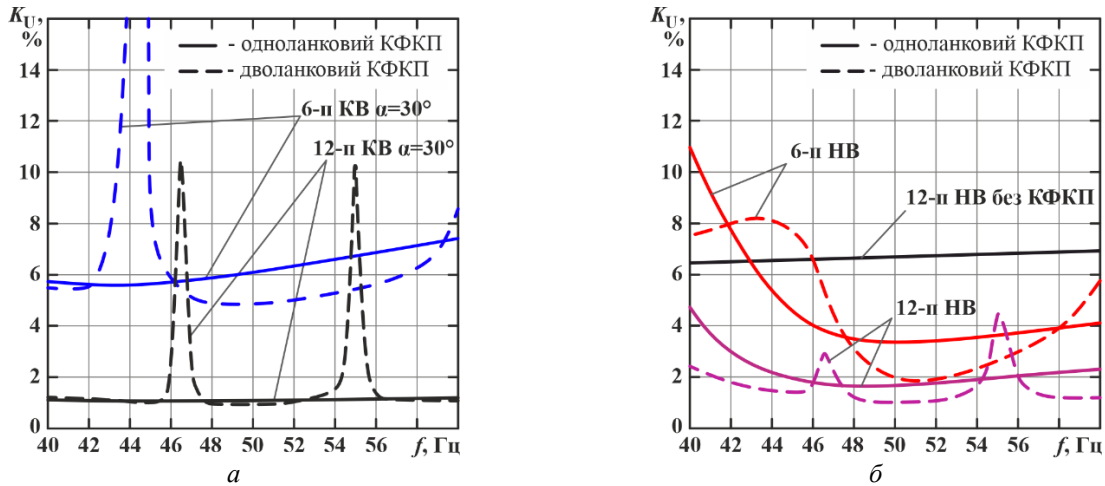


Рис. 6. Залежності  $K_U$  від відхилень частоти в діапазоні  $f = (50 \pm 10)$  Гц для систем з одно- та дволанковими КФКП: *a* – при 6- та 12-пульсному вхідному КВ ПЧ; *б* – при 6- та 12-пульсному вхідному НВ ПЧ

Виявлені закономірності добре узгоджуються з частотними характеристиками еквівалентного повного опору СЕЕС з одно- та дволанковими КФКП  $Z_E(f)$ , представленими відповідно на рис. 7 *a*, *б*.

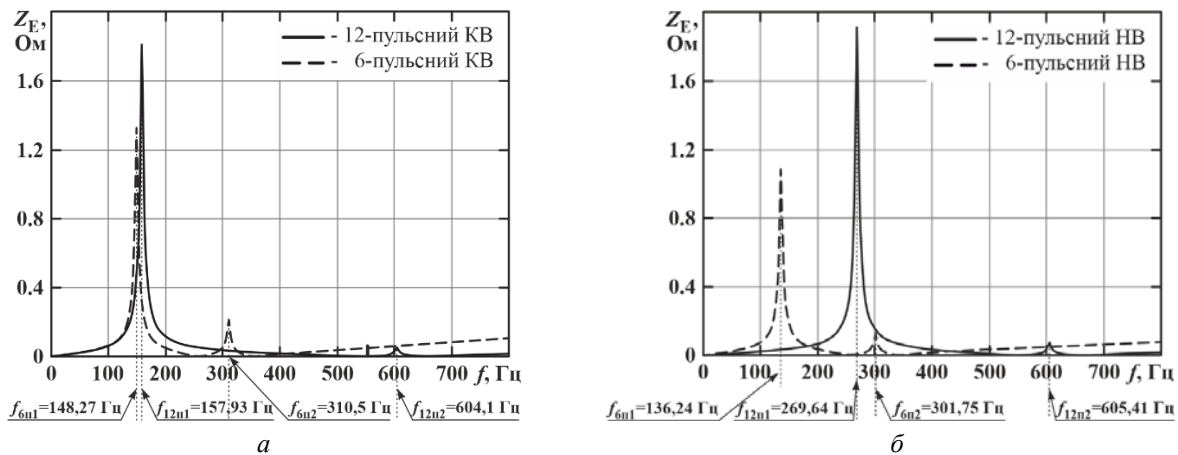


Рис. 7. Частотні характеристики еквівалентного повного опору СЕЕС  $Z_E(f)$  з одно- (*a*) та дволанковими (*б*) КФКП

На графіках  $Z_E(f)$  спостерігаються максимуми – полюси, на частотах яких виникає резонансне підвищення гармонік напруги мережі, що в свою чергу спричиняє різке зростання  $K_U$ . Характер графіків характеристик  $K_U(f)$  пояснюється тим, що при відхиленнях частоти мережі спостерігаються відповідні зміни частотного діапазону кожної гармоніки, генерованої в мережу вхідним випрямлячем ПЧ; граничні частоти цього діапазону дорівнюють добутку найменшого та найбільшого значення частоти мережі на порядок гармоніки. Якщо в цей діапазон потрапляють частоти полюсів еквівалентного опору системи, то спостерігається резонансне підвищення відповідних гармонік, а отже, і інтегрального коефіцієнта спотворення  $K_U$ . Виявлена і описана закономірність спостерігається в СЕЕС тільки з дволанковими КФКП, що наочно ілюструється залежностями  $K_U(f)$  на рис. 6 а, б.

**Висновки.** Отже, з одного боку, застосування дволанкових КФКП замість одноланкових забезпечує значно більш ефективне (в 2...5 разів) послаблення  $K_U$ , а з іншого боку, при відхиленнях частоти мережі необхідна додаткова перевірка систем з дволанковими КФКП на відсутність резонансного підвищення  $K_U$ . З графіків  $K_U(f)$  на рис. 6 а, б випливає, що зазначена вимога завжди виконується за умови  $\Delta f = \pm 5\%$ , що відповідає нормам на допустимі сталі відхилення частоти, згідно з морськими стандартами [2]. У перехідних режимах, коли допускається  $\Delta f = \pm 10\%$  [2], щоб уникнути резонансного підвищення  $K_U$  слід застосовувати тільки одноланкові КФКП.

1. Mindykowski J., Tarasiuk T., Gnaciński P. Review of Legal Aspects of Electrical Power Quality in Ship Systems in the Wake of the Novelisation and Implementation of IACS Rules and Requirement. *Energies* 2021, 14, 3151. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14113151>
2. Mindykowski J. Contemporary challenges to power quality in ship systems-metrological perspective. In Proceedings of the 22nd IMEKO TC4 International Symposium 20th, *International Workshop on ADC Modelling and Testing*, Iasi, Romania, 14–15 September 2017; Pp. 536–558. URL: <https://www.imeko.info/publications/tc4-2017/IMEKO-TC4-2017-106.pdf>
3. Report on the investigation of the catastrophic failure of a capacitor in the aft harmonic filter room on board RMS «Queen Mary 2» while approaching Barcelona 23 September 2010. MAIB. Less Serious Casualty Report №28/2011 December 2011.
4. Evans I., Hoevenaars H., Meeting harmonics limits on marine vessels, *Proceedings of the IEEE Electric Ship Technologies Symposium*, ESTS'07, Arlington, VA, USA, 21-23 May 2007, Pp. 115–121.
5. Hoevenaars T. Passive vs Active Harmonic Mitigation. *PQ Synergy Conference: Chang Rai, Thailand*, Apr. 24 – 27, 2017.
6. Жук А.К., Жук Д.А. Криворучко Д.В. Фильтрокомпенсирующее устройство с широтно-импульсным регулированием реакторного компенсатора. *Електротехніка і електромеханіка*. 2016, №4(2), С. 59–66. URL: <https://eir.nuos.edu.ua/items/d2d75d68-3eeb-48b8-9636-53a144110cb5>
7. Zhuk O., Zhuk D., Kryvoruchko D., D'yakonov O. Control of Improved Hybrid Power Line Conditioner. Proceedings of the IEEE 38th International Conference on *Electronics and Nanotechnology (ELNANO-2018)*, Pp. 605–610. DOI: <https://doi.org/10.1109/ELNANO.2018.8477453>

## IMPROVEMENT OF MEANS OF ENSURING THE QUALITY OF ELECTRICAL ENERGY IN VESSEL EES WITH SEMICONDUCTOR PROPULSION COMPLEXES

**D.O. Zhuk, O.K. Zhuk, M.O. Kozlov**

National university of shipbuilding n.a. admiral Makarov,  
Pr. of Ukrainian heroes, 9, Mykolaiv, 54025, Ukraine  
e-mail: [dmytro.zhuk@nuos.edu.ua](mailto:dmytro.zhuk@nuos.edu.ua)

*Considered are possible directions for improving the means of ensuring the quality of electric power (PQ) in order to increase their efficiency, taking into account the schematic and mode features of integrated ship electric power systems (SEPS) with semiconductor propulsion complexes (SPC). One- and two-link variants of system controlled filter compensation devices (CFCD) designed for simultaneous full compensation of reactive power, as well as significant weakening of harmonic distortions of voltage and current in SEPS with SPC, are proposed and investigated. A modeling approach has been implemented that allows to compare the effect of the proposed CFCD on the integral coefficient of*

voltage harmonic distortions in systems with different types of input rectifiers as part of the frequency converters (FC) of the SPC, taking into account the possible deviation of the frequency of the ship's network. Ref. 7, fig.7, table.

**Keywords:** power quality, ship power system, ship semi-conductor propulsive complex, frequency converter, controlled filter compensation device.

1. Mindykowski J., Tarasiuk T., Gnaciński P. Review of Legal Aspects of Electrical Power Quality in Ship Systems in the Wake of the Novelisation and Implementation of IACS Rules and Requirement. *Energies* 2021, 14, 3151. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14113151>
2. Mindykowski J. Contemporary challenges to power quality in ship systems-metrological perspective. In Proceedings of the 22nd IMEKO TC4 International Symposium 20th, *International Workshop on ADC Modelling and Testing*, Iasi, Romania, 14–15 September 2017. Pp. 536–558. URL: <https://www.imeko.info/publications/tc4-2017/IMEKO-TC4-2017-106.pdf>
3. Report on the investigation of the catastrophic failure of a capacitor in the aft harmonic filter room on board RMS «Queen Mary 2» while approaching Barcelona 23 September 2010. MAIB. Less Serious Casualty Report №28/2011 December 2011.
4. Evans I., Hoevenaars H., Meeting harmonics limits on marine vessels, *Proceedings of the IEEE Electric Ship Technologies Symposium*, ESTS'07, Arlington, VA, USA, 21-23 May 2007, Pp. 115–121.
5. Hoevenaars T. Passive vs Active Harmonic Mitigation. *PQ Synergy Conference*: Chang Rai, Thailand, Apr. 24–27, 2017.
6. Zhuk A.K., Zhuk D.A. Krivoruchko D.V. Filter-compensating device with pulse-width regulation of the reactor compensator. *Electrical engineering and electromechanics*. 2016, No. 4(2). Pp. 59–66. (Rus) URL: <https://eir.nuos.edu.ua/items/d2d75d68-3eeb-48b8-9636-53a144110cb5>
7. Zhuk O., Zhuk D., Kryvoruchko D., D'yakonov O. Control of Improved Hybrid Power Line Conditioner. Proceedings of the IEEE 38th International Conference on *Electronics and Nanotechnology* (ELNANO-2018). Pp. 605–610. DOI: <https://doi.org/10.1109/ELNANO.2018.8477453>

Надійшла: 13.05.2024

Прийнята: 05.07.2024

Submitted: 13.05.2024

Accepted: 05.07.2024



УДК629.374.7

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2024.68.037>

## ВПЛИВ ПУЛЬСАЦІЙ ІМПУЛЬСНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА НА ПОХИБКУ СЛІДКУВАННЯ ЗА ШВИДКІСТЮ БОРТОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА

О.А. Рослік\*, В.А. Скугарєв\*\*

Національний університет «Чернігівська політехніка»,  
вул. Шевченка, 95, Чернігів, 14030, Україна  
e-mail: [aleksey.roslik93@gmail.com](mailto:aleksey.roslik93@gmail.com)

*Проведено аналіз похибки слідування з урахуванням пульсацій напруги живлення електродвигуна. Представлено результати розрахунку сталої похибки слідування з урахуванням впливу пульсацій, що є наслідком процесу широтно-імпульсної модуляції (ШИМ). Процес ШИМ представлено еквівалентною АІМ певної кількості прямокутних функцій ряду Уолша-Фур'є. Закон зміни амплітуд цих функцій у процесі ШИМ лінійний або кусково-лінійний із постійним коефіцієнтом підсилення на кінцевому інтервалі. Це дало можливість використати математичний апарат модифікованого Z-перетворення для аналізу впливу пульсацій ШИМ на похибку слідування. Бібл. 7, рис. 2.*

**Ключові слова:** слідувальний електропривод, широтно-імпульсна модуляція, похибка слідування.

**Вступ. Постановка проблеми.** Бортові системи [1] слідувального електропривода застосовують для слідування за законом зміни швидкості робочого органу бортового механізму літального апарату, який задано на вході системи. Цей процес повинен проходити швидко, плавно, з мінімальним відхиленням від закону зміни керувального сигналу. Для виконання цих вимог систему слідувального електропривода будують згідно з принципом підпорядкованого регулювання. Регулятори їхніх контурів забезпечують мінімальне відхилення закону зміни параметра, що регулюється, від закону зміни сигналу завдання на вході системи. Такі відхилення можливі під впливом збурень за управлінням та за навантаженням. Але в системі слідувального електропривода існують внутрішні фактори, які теж впливають на процес слідування. Насамперед це пульсації живлячої напруги на виході імпульсного перетворювача, що циркулюють замкненими контурами системи і впливають на похибку слідування. Існує актуальна проблема оцінки впливу пульсацій на головний показник слідувального електропривода – похибку слідування.

**Аналіз основних досліджень і публікацій.** Силова ланка системи слідувального електропривода – це перетворювач електроенергії з широтно-імпульсною або частотно-імпульсною модуляцією. На його виході в електроприводах постійного струму формується постійна напруга в сукупності зі спектром гармонічних складових (пульсацій). На вході системи слідування задається закон, згідно з яким формується закон зміни вихідного параметра, що регулюється (кут оберту, швидкість, лінійне переміщення). Для досягнення мінімального відхилення між законами зміни цих сигналів система підпорядкованого регулювання формує необхідні закони у своїх контурах за допомогою регуляторів. Основними факторами, які впливають на похибку слідування є збурювальні впливи, а також пульсації перетворювача. У відомих публікаціях [2], [3], присвячених аналізу систем слідувального електропривода, основна увага приділяється впливу змін керувального та збурювального впливів на їхні динамічні та статичні показники, без оцінки впливу на них пульсацій живлячої напруги. Причина ігнорування впливу пульсацій на головні показники системи слідування – відсутність математичного апарату для аналізу систем із широтно-імпульсною та частотно-імпульсною модуляцією. Тому в роботах [4-6] силовий дискретний перетворювач зі складним процесом імпульсної модуляції вважається неперервною ланкою з постійним коефіцієнтом передачі, або ж неперервною ланкою запізнення, яке складає половину періоду комутації. Такий підхід дає задовільні результати в системах слідування з обмеженою смугою пропускання, тобто для грубих систем. На борту літальних апаратів існує актуальна проблема точного слідування за законом, що заданий. Метою цього дослідження є аналіз похибки



слідкування електропривода з урахуванням впливу пульсації ШПІ постійної напруги, а також розробка рекомендацій стосовно врахування цих пульсацій у разі реалізації регулятора головного контуру системи слідкувального електропривода із забезпеченням у ньому процесів кінцевої тривалості без перерегулювання.

**Викладення основного матеріалу.** На рис. 1 подано вихідну структурну схему системи підпорядкованого керування (а) та перетворену (б) схему з метою аналізу впливу пульсацій ШПІ на похибку слідкування за швидкістю.

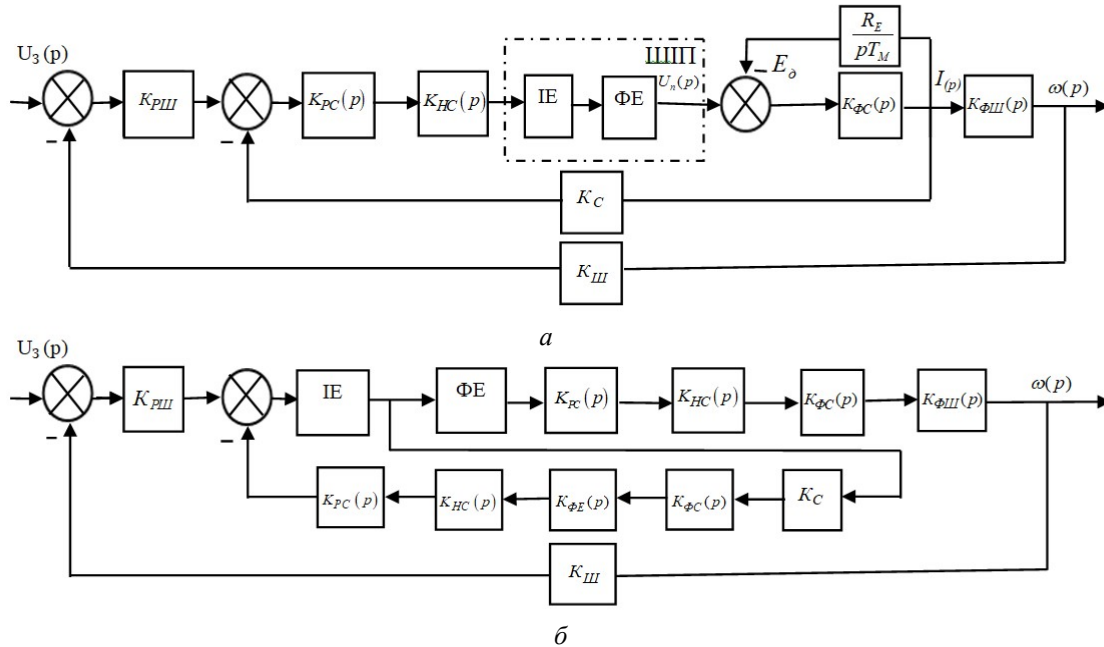


Рис. 1. Вихідна структурна схема (а) та перетворена схема (б) системи автоматичного регулювання

На структурних схемах системи автоматичного регулювання позначено:  $E_o$  – проти-ЕРС двигуна; ШПІ – широтно-імпульсний перетворювач;  $K_{рш}$  – коефіцієнт передачі пропорційного регулятора контуру швидкості;  $K_C, K_{ш}$  – коефіцієнти передачі давачів струму та швидкості;

$K_{PC}(p) = \frac{(pT_E + 1)R_E}{pT_C K_{n0} K_C}$  – передавальна функція регулятора контуру струму, де  $T_E = \frac{L}{R_E}$ ,  $L$  – індуктивність обмотки електродвигуна,  $R_E$  – опір головної ланки живлення,  $T_C = b_c T_\mu$  – стала часу інтегрування контуру струму, де  $b_c$  – коефіцієнт, що представляє собою відношення сталої часу інтегрування контуру струму до некомпенсованої сталої часу, задає рівень демпфірування коливань струму під час відпрацювання стрибка завдання на вході, у випадку налагодження системи на технічний оптимум  $b_c = 2$ ;  $T_\mu$  – некомпенсована стала часу контуру струму, яка залежить від параметрів фільтрів на вході регулятора, давача струму та частоти;  $K_{n0}$  – коефіцієнт передачі ШПІ за постійною складовою;

$K_{HC}(p) = \frac{1}{pT_\mu + 1}$  – передавальна функція некомпенсованої ланки;  $K_{\phi C}(p) = \frac{1}{R_E(pT_E + 1)}$  – пере-

давальна функція ланки формування струму;  $K_{\phi ш}(p) = \frac{\pi R_E}{pT_M C_{E\phi} 30}$  – передавальна функція

ланки формування швидкості, де  $T_M$  – механічна стала часу;  $U_3(p) = \frac{\alpha}{p^2}$  – зображення сигнала

завдання за лінійним законом зміни швидкості;  $\alpha$  – тангенс кута нахилу лінії, що задає закон зміни швидкості.

У роботі [7] показано, що процес широтно-імпульсної модуляції в зоні кінцевої довжини можна замінити еквівалентною амплітудно-імпульсною модуляцією імпульсу кінцевої тривалості на виході перетворювача, яка має вигляд:

$$K_n(p) = NK_i^{weli} \frac{e^{-\frac{i}{N}pT} - e^{-\frac{i+1}{N}pT}}{p}.$$

Це передавальна функція формуючого елемента ШПІ для  $i = 0, 1, 2, \dots, N-1$  зон модуляції, де:  $N$  – кількість функцій Уолша, що апроксимують процес широтно-імпульсної модуляції в кінцевій зоні,  $K_i^{weli}$  – коефіцієнт підсилення амплітуди відповідної функції Уолша (Walsh) в  $i$ -ї зоні модуляції, який за модуляції прямокутного імпульсу для всіх зон модуляції дорівнює одиниці [7]. На рис. 1 б зворотний зв'язок за протиЕРС не враховано. Його впливом нехтуємо, приймаючи припущення, що зворотний зв'язок за проти ЕРС є обурювальною дією для контуру регулювання струму та за відповідного налаштування регуляторів.

**Аналіз похибки слідкування з урахуванням пульсацій напруги живлення електродвигуна.** У процесі широтно-імпульсної модуляції цієї напруги, окрім постійної складової, на виході ШПІ формується нескінченний ряд гармонік, які в межах смуги пропускання системи слідкування суттєво впливають на її динамічні та статичні характеристики. Вплив пульсацій на динамічні показники найбільш помітний у слідкувальних електроприводах, які знаходять застосування в системах бортової автоматики. Виконаємо аналіз похибки слідкування в такому електроприводі з урахуванням впливу на неї пульсацій напруги живлення електродвигуна. Для цього перетворимо схему, зображену на рис. 1 а, в схему, показану на рис. 1 б. Передаточна функція ланцюга зворотного зв'язку, що охоплює імпульсний елемент, з урахуванням передаточних функцій окремих ланок, має вигляд:

$$K_1(p) = NK_i^{weli} \frac{e^{-\frac{i}{N}pT} - e^{-\frac{i+1}{N}pT}}{p} \times \frac{K_C}{pT_C(pT_\mu + 1)}.$$

Переходячи до відносної комплексної змінної  $q = pT$ , отримуємо:

$$K_1(q) = K_{01} \frac{e^{-\frac{i}{N}q} - e^{-\frac{i+1}{N}q}}{q^2(q + \beta)}, \quad (1)$$

де:  $\beta = \frac{T}{T_\mu}$ ,  $K_{01} = \frac{NT^2 K_i^{weli} K_C}{T_C T_\mu}$ . Тут  $K_i^{weli}$  – коефіцієнт підсилення амплітуди конкретної функції Уолша в процесі ШІМ в  $i$ -й зоні.

У (1) полюси  $q_{1,2} = 0$ ,  $q_3 = -\beta$ , лишки для них:  $A_1 = \frac{1}{\beta}$ ,  $A_2 = -\frac{1}{\beta^2}$ ,  $A_3 = \frac{1}{\beta^2}$ .

Дискретна передавальна функція ланцюга, що охоплює імпульсний елемент, є модифіковане Z-перетворення (1):

$$W_1^*(z, \varepsilon) = K_{01} \left[ \frac{A_1}{(z-1)N} + A_1 \left( \varepsilon - \frac{i}{N} \right) - \frac{A_1(N-1)}{N(z-1)} + A_2 + A_3 \frac{z - e^{-\beta \left( \varepsilon - \frac{i}{N} \right)}}{z - e^{-\beta}} e^{-\beta \left( \varepsilon - \frac{i}{N} \right)} \right], \quad (2)$$

$$\frac{i}{N} \leq \varepsilon \leq \frac{i+1}{N}.$$

Аналогічно отримаємо дискретну передавальну функцію ланцюга, що охоплює імпульсний елемент, на інтервалі  $\frac{i+1}{N} \leq \varepsilon \leq 1$

$$W_{11}^*(z, \varepsilon) = K_{01} \left[ \frac{A_1}{(z-1)N} + \frac{A_3 z \left( 1 - e^{-\frac{\beta}{N}} \right)}{z - e^{-\beta}} e^{-\beta \left( \varepsilon - \frac{i}{N} \right)} \right]. \quad (3)$$



У момент спрацювання імпульсного елемента дискретна передавальна функція  $W_I^*(z,1) = z^{-1} \lim_{\varepsilon \rightarrow 1} W_I^*(z,\varepsilon)$ ; з урахуванням (3) маємо:

$$W_{11}^*(z,1) = K_{01} \left[ \frac{A_1}{(z-1)N} + \frac{A_3 z \left(1 - e^{-\frac{\beta}{N}}\right)}{z - e^{-\beta}} e^{-\beta \left(\frac{N-i}{N}\right)} \right]. \quad (4)$$

Дискретна передавальна функція замкненого контуру струму в момент спрацювання імпульсного елемента:  $W_{3C}^*(z,1) = \frac{1}{1 + W_I^*(z,1)}$ .

Ураховуючи (4), отримуємо

$$W_{3C}^*(z,1) = \frac{N(z-1)(z - e^{-\beta})}{N(z-1)(z - e^{-\beta}) + K_{01} \left[ A_1(z - e^{-\beta}) + A_3 N \left(1 - e^{-\frac{\beta}{N}}\right) \times e^{-\beta \left(\frac{N-i}{N}\right)} \right]}. \quad (5)$$

Знайдемо дискретну передавальну функцію ланцюга формування швидкості. Як видно з рис. 1 б, передавальна функція його приведеної неперервної частини для відносного значення комплексної змінної

$$K_{ПНЧ}(q) = K_{02} \left( e^{-\frac{i}{N}q} - e^{-\frac{i+1}{N}q} \right) \times \frac{1}{q^3(q + \beta)}, \quad (6)$$

де  $K_{02} = \frac{TK_{PШ} \times K_{Ш} \times T^3 NK_i^{wali} R_E}{30T_M \times T_C \times T_\mu \times C_{EФ}}$ .

Для кратних нульових полюсів  $q_1 = q_2 = q_3 = 0$  та для полюса  $q_4 = -\beta$  лишки мають такі значення:  $B_1 = \frac{1}{\beta}$ ,  $B_2 = -\frac{1}{\beta^2}$ ,  $B_3 = \frac{1}{\beta^3}$ ,  $B_4 = -\frac{1}{\beta^3}$ .

У результаті процедури Z-перетворення (6) для  $\frac{i+1}{N} \leq \varepsilon \leq 1$  маємо:

$$W_2^*(z,\varepsilon) = K_{02} z \left\{ \frac{\left[ N + (\varepsilon N - 0,5 - i)(z-1) \right] (z - e^{-\beta}) B_1 + B_2 N (z - e^{-\beta})(z-1) + B_4 \left(1 - e^{-\frac{\beta}{N}}\right) e^{-\beta \left(\frac{\varepsilon - i}{N}\right)} N^2 (z-1)^2}{N^2 (z-1)(z - e^{-\beta})} \right\}. \quad (7)$$

Для моменту спрацювання імпульсного елемента  $W_2^*(z,1) = z^{-1} \lim_{\varepsilon \rightarrow 1} W_2^*(z,\varepsilon)$ . З урахуванням

ням (7), маємо  $W_2^*(z,1) = K_{02} \frac{B_1 N (z - e^{-\beta}) + (z-1) \sum_1^3 a_k}{N^2 (z-1)^2 (z - e^{-\beta})}$ , де  $a_1 = B_1 (N - 0,5 - i)(z - e^{-\beta})$ ,

$$a_2 = B_2 N (z - e^{-\beta}), \quad a_3 = B_4 \left(1 - e^{-\frac{\beta}{N}}\right) N^2 e^{-\beta \left(1 - \frac{i}{N}\right)} (z-1).$$

Дискретна передавальна функція розімкненого контуру швидкості для моменту спрацювання імпульсивного елемента така:  $W_{PШ}^*(z,1) = W_2^*(z,1) \times W_{3C}^*(z,1)$ . З урахуванням (5), (7),

маємо  $W_{PШ}^*(z,1) = \frac{K_{02} \left[ B_1 N (z - e^{-\beta}) + (z-1) \sum_1^3 a_k \right]}{N^2 (z-1)^2 \left[ (z-1)(z - e^{-\beta}) + K_{01} (A_1 (z - e^{-\beta}) + b_1 (z-1)) \right]}$ , де  $b_1 = A_3 N \left(1 - e^{-\frac{\beta}{N}}\right) e^{-\beta}$ .

Дискретна передавальна функція за помилкою:

$$W_{IM}^*(z,1) = \frac{1}{1 + W_{PШ}^*(z,1)} = \frac{N^2 (z-1) \left\{ (z-1)(z - e^{-\beta}) + K_{01} A_1 \left[ (z - e^{-\beta}) + b_1 (z-1) \right] \right\}}{N^2 (z-1) \left\{ (z-1)(z - e^{-\beta}) + K_{01} \left[ A_1 (z - e^{-\beta}) + b_1 (z-1) \right] \right\} + K_{02} \left[ B_1 N (z - e^{-\beta}) + (z-1) \sum_1^3 a_k \right]}. \quad (8)$$

Знайдемо сталі значення помилки слідкування за зміни завдання за лінійним законом  $U_3(t) = \alpha n$ , де  $n = 0, 1, 2, 3, \dots$  – номер періоду слідкування Z-зображення помилки слідкування:

$$\Delta^*(z, 1) = U_3(z, 1) \times W_{ПМ}(z, 1), \quad (9)$$

де  $U_3^*(z, 1) = \frac{\alpha z}{(z-1)^2}$  – Z-зображення лінійної функції закону слідкування.

Сталі значення помилки слідкування в момент спрацювання імпульсного елемента отримуємо, використовуючи теорему про кінцеве значення градчастої функції, яка справедлива для прямих різниць градчастої функції:  $\Delta_{cm}^*(n, 1) = \lim_{z \rightarrow 1} (z-1) \times \Delta^*(z, 1)$ .

З урахуванням (8), (9) маємо:  $\Delta_{cm}^*(n, 1) = \frac{\alpha K_{01} A_1 (1 - e^{-\beta}) N^2}{NK_{02} B_1 (1 - e^{-\beta})}$ . Оскільки  $A_1 = B_1$ , то остато-

чно отримуємо:  $\Delta_{cm}^*(n, 1) = \frac{\alpha K_{01} N}{K_{02}}$ .

З урахуванням значень  $K_{01}, K_{02}$  переходимо від відносного часу  $\bar{t} = \frac{t}{T}$  до його абсолютного значення. Маємо:

$$\Delta_{cm}^*(n, 1) = \frac{30\alpha K_c T_M C_{E\Phi}}{\pi K_{PШ} K_{ш} R_E \times \gamma}, \quad (10)$$

де  $\gamma = \frac{1}{N}$  – відносна довжина зони ШІМ у сталому режимі. З (10) видно, що, коли  $\gamma = 1$ , то це відповідає результату аналізу похибки слідкування за постійною складовою. За зменшення  $\gamma$  помилка слідкування зростає і, коли кількість функцій Уолша  $N \rightarrow \infty$ , то  $\gamma \rightarrow 0$ , що призводить до відомого результату, коли ШІМ відбувається в межах імпульсу нульової довжини з нескінченно великою амплітудою ( $\delta$ -функція). На рис. 2 зображено результати розрахунку за формулою (10) сталої похибки слідкування з урахуванням впливу пульсацій, що є наслідком процесу ШІМ. Розрахунок виконано для безколекторного двигуна постійного струму БМД-Гф1, що має такі параметри:  $U = 15\text{В}$ ,  $M = 0,152\text{нм}$ ,  $\omega = 200 \frac{1}{\text{сек}}$ ,  $C_{E\Phi} = 7,5 \cdot 10^{-3} \frac{\text{ВхВ}}{\text{об}}$ , коефіцієнти системи:  $K_{ш} = 10 \frac{\text{В}}{\text{об}}$ ,  $K_c = 80\text{Ом}$ ,  $K_{PШ} = 5$ .

З рис. 2 видно, що збільшення тангенса кута нахилу прямої лінійного закону слідкування та зменшення довжини зони ШІМ призводить до значного підвищення похибки слідкування. Якщо ШІМ відбувається в межах періоду, то похибка слідкування відповідає результату її розрахунку за постійною складовою. Під час аналізу похибки слідкування за постійною складовою не можна завершити перехідний процес за кінцевий час без перерегулювання. На відміну від цього аналіз з урахуванням ШІМ вихідної напруги, перетворювача дає змогу отримати перехідний процес за кінцевої тривалості без перерегулювання. Для цього необхідно синтезувати регулятор контуру швидкості за критерієм швидкодії, що вимагає окремого аналізу.

Результати дослідження обмежені випадком детермінованого вхідного лінійного сигналу. Методику, що запропоновано, можна поширити на інші форми вхідних детермінованих сигналів.

**Висновок.** За результатами аналізу, що проведено, встановлено вплив пульсацій ШІП та параметрів лінійного слідкувального сигналу на сталу похибку слід-

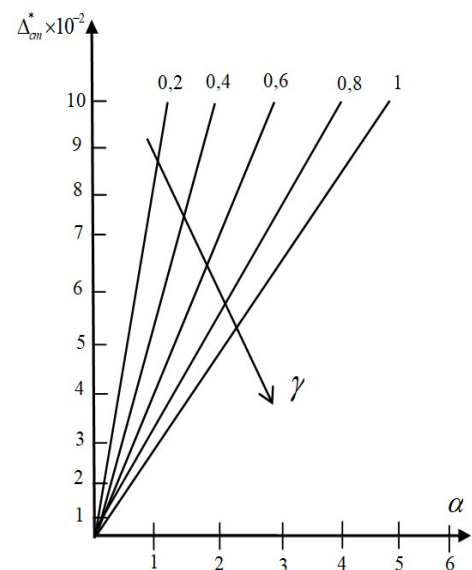


Рис. 2. Результати розрахунку сталої похибки слідкування з урахуванням впливу пульсацій

кування за швидкістю. На основі отриманих результатів у системі електропривода можна забезпечити мінімальну похибку слідування за швидкістю в разі її налаштуванні на процесі кінцевої тривалості.

1. Moir L. Military Avionics Systems, L. Moir, A. Seabridge. John Wiley Sons, Ltd: 2006. -520 p.
2. Guo X., Zeng S., Zhong R. and Hua W. High-Precision Injection Current Sampling Scheme for Direct Drive Low-Speed Position Sensorless Control of Switched Reluctance Machine, in IEEE Transactions on Industrial Electronics, DOI: <https://orcid.org/10.1109/TIE.2024.3366219>
3. Fornaro E., Cardone M. and Dannier A. Hybrid Electric Aircraft Model Based on ECMS Control, 2022 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), Sorrento, Italy, 2022. Pp. 865–870. DOI: <https://orcid.org/10.1109/SPEEDAM53979.2022.9842154>
4. Guo F., Ma Z., Diao F., Zhao Y. and Wheeler P. Hybrid Virtual Coordinate-Driven CBPWM Strategy of Three-Level T-Type NPC Converters for Electric Aircraft Propulsion Applications, in IEEE Transactions on Industrial Electronics, March 2024. Vol. 71. No. 3. Pp. 2309–2319. DOI: <https://orcid.org/10.1109/TIE.2023.3266552>
5. Revko A.S. and Yershov R.D. Control Rapidity Optimization Technique of DC-Motor Driven by Quasi-Resonant Converter Using Pontryagin's Maximum Principle, 2018 IEEE 38th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), Kyiv, Ukraine, 2018. Pp. 705–710. DOI: <https://orcid.org/10.1109/ELNANO.2018.8477491>
6. Xu J., Guo S., Guo H. and Tian X. Fault-Tolerant Current Control of Six-Phase Permanent Magnet Motor With Multifrequency Quasi-Proportional-Resonant Control and Feedforward Compensation for Aerospace Drives, in IEEE Transactions on Power Electronics, Jan. 2023. Vol. 38. No. 1. Pp. 283–293. DOI: <https://orcid.org/10.1109/TPEL.2022.3202929>
7. Вентильные преобразователи в системах точной стабилизации: моногр. А.И. Денисов, В.М. Зволинский, Ю.В. Руденко. Киев: Наук.думка, 1997. 249 с.

#### INFLUENCE OF PULSATIONS OF THE PULSE CONVERTER ON THE ERROR OF FOLLOWING THE SPEED OF THE ON-BOARD ELECTRIC DRIVE

O.A. Roslik, V.A. Skuhariiev

Chernihiv Polytechnic National University,  
str. Shevchenka, 95, Chernihiv, 14035, Ukraine  
e-mail: [aleksey.roslik93@gmail.com](mailto:aleksey.roslik93@gmail.com)

*An analysis of the tracking error was performed without taking into account the pulsations of the electric motor supply voltage and taking into account the pulsations of the electric motor supply voltage. The results of the calculation of the constant tracking error are presented, taking into account the influence of pulsations, which is a consequence of the pulse width modulation (PWM) process. Ref. 7, fig. 2.*

**Keywords:** tracking electric drive, pulse width modulation, tracking error.

1. Moir L. Military Avionics Systems. L. Moir, A. Seabridge. John Wiley Sons, Ltd: 2006. 520 p.
2. Guo X., Zeng S., Zhong R. and Hua W. High-Precision Injection Current Sampling Scheme for Direct Drive Low-Speed Position Sensorless Control of Switched Reluctance Machine, in IEEE Transactions on Industrial Electronics, DOI: <https://orcid.org/10.1109/TIE.2024.3366219>
3. Fornaro E., Cardone M. and Dannier A. Hybrid Electric Aircraft Model Based on ECMS Control. 2022 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), Sorrento, Italy, 2022. Pp. 865–870. DOI: <https://orcid.org/10.1109/SPEEDAM53979.2022.9842154>
4. Guo F., Ma Z., Diao F., Zhao Y. and Wheeler P. Hybrid Virtual Coordinate-Driven CBPWM Strategy of Three-Level T-Type NPC Converters for Electric Aircraft Propulsion Applications, in IEEE Transactions on Industrial Electronics, March 2024. Vol. 71. No. 3. Pp. 2309–2319. DOI: <https://orcid.org/10.1109/TIE.2023.3266552>
5. Revko A.S. and Yershov R.D. Control Rapidity Optimization Technique of DC-Motor Driven by Quasi-Resonant Converter Using Pontryagin's Maximum Principle, 2018 IEEE 38th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), Kyiv, Ukraine, 2018. Pp. 705–710. DOI: <https://orcid.org/10.1109/ELNANO.2018.8477491>
6. Xu J., Guo S., Guo H. and Tian X. Fault-Tolerant Current Control of Six-Phase Permanent Magnet Motor With Multifrequency Quasi-Proportional-Resonant Control and Feedforward Compensation for Aerospace Drives, in IEEE Transactions on Power Electronics, Jan. 2023. Vol. 38. No. 1. Pp. 283–293. DOI: <https://orcid.org/10.1109/TPEL.2022.3202929>
7. Denysov A.I., Zvolinskyi V.M., Rudenko Yu.V. Valve converters in precision stabilization systems. Kyiv: Naukova Dumka, 1997. 249 p. (Rus)

Надійшла: 13.05.2024

Прийнята: 05.07.2024

Submitted: 13.05.2024

Accepted: 05.07.2024

УДК 681.5.033 + 681.587'57

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2024.68.043>

## УТОЧНЕНА МОДЕЛЬ ДВОКАНАЛЬНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА ПОДАЧІ З ПІДСУМОВУВАННЯМ РУХІВ НА ХОДОВІЙ ГАЙЦІ ДЛЯ ВИСОКОТОЧНИХ МЕТАЛОРІЗАЛЬНИХ ВЕРСТАТІВ

О.А. Худяєв\*, канд. техн. наук, В.М. Шамардіна\*\*, канд. техн. наук,  
Д.О. Пшеничников\*\*\*, канд. техн. наук,  
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,  
вул. Кирпичова, 2, Харків, 61002, Україна  
e-mail: [Vira.Shamardina@khp.edu.ua](mailto:Vira.Shamardina@khp.edu.ua)

*Ітераційний двоканальний електропривод (ЕП) подачі з підсумовуванням рухів на обертовій ходовій гайці (ОХГ) призначений для підвищення швидкодії й точності традиційних одноканальних ЕП механізмів подачі (МП) металорізальних верстатів з інерційним робочим органом (РО). Відповідно до МП РО координатного верстата особливо високої точності моделі 24К60АФ4 одержано уточнену узагальнену математичну модель руху двоканального ЕП з ОХГ. У моделі враховано вплив основних статичних моментів опору під час металообробки, а також – нелінійних сил тертя ковзання в МП РО верстата. Для розрахунку та моделювання характерних ділянок лінеаризованої характеристики тертя одержано зручні рекурентні співвідношення. Запропоновано структурно-алгоритмічну схему ітераційного двоканального компенсованого ЕП подачі з ОХГ та підлеглим налаштуванням каналів керування, яка дає змогу компенсувати в усталених режимах негативний вплив на точність подачі РО основних статичних моментів опору та нелінійностей тертя ковзання в навантаженому приводі. Бібл. 9, рис. 3, таблиця.*

**Ключові слова:** ітераційний двоканальний електропривод подачі, механізм подачі робочого органу, обертова ходова гайка, узагальнена математична модель руху, нелінійні сили тертя ковзання.

**Актуальність роботи.** Електроприводи (ЕП) механізмів подачі (МП) прецизійних координатних металорізальних верстатів і обробних центрів призначені для швидкого й точного перетворення впливів програмних завдань у керуючі сигнали із наступним здійсненням механічних переміщень інерційного робочого органу (РО) із високою плавністю на гранично малих швидкостях подавання, яка істотно впливає на стійкість руху і шорсткість оброблюваної поверхні [1]. Досягнення бажаних динамічних показників якості керування подачею вимагає від традиційних одноканальних ЕП МП надмірно великих значень коефіцієнта підсилення та ширини смуги пропускання. Можливі шляхи розв'язання проблеми потребують застосування більш ефективних багатоканальних [2] і багатоконтурних [3–5] структур систем керування ЕП, а також розробки відповідних конструкцій виконавчих пристроїв [6, 7], які дають змогу одночасно підвищити і швидкодію, і точність керування переміщенням РО. Удосконалення таких структур потребує використання у процесі їхнього синтезу математичних моделей, які враховують більшість факторів впливу на якість роботи системи ЕП, насамперед, механічних.

**Постановка задачі.** Ефективним структурним способом підвищення швидкодії та динамічної точності ЕП подачі РО за збереження необхідних силових впливів на об'єкт керування є застосування багатоканальних систем керування, що побудовані за ітераційним або близьким до ітераційного [8] принципом взаємодії каналів. Одним із можливих варіантів ітераційних ЕП МП є двоканальний ЕП подачі РО на базі дводвигунного безредукторного приводного механізму (ПМ) з обертовою ходовою гайкою (ОХГ), який реалізує шарико-гвинтову пару (ШГП) із підсумовуванням рухів на ходовій гайці. У роботі [6] для прецизійного металорізального верстата моделі 24К60АФ4 (маса понад 22 т) розглянуто схему конструкції, спрощену структуру і математичну модель ітераційного двоканального ЕП МП з ОХГ і налаштуванням каналів керування за принципом систем підлеглого регулювання (СПР). Однак не були визначені й враховані всі діючі статичні моменти опору в навантаженому приводі, не враховано вплив нелінійних сил тертя ковзання в МП РО верстата, а також потребують уточнення базові характеристики силових і виконавчих пристроїв приводів каналів керування.







відповідно двигунів Д1 і Д2;  $F_{1+2}$  і  $V_{1+2}$  – результуюча (сумарна) осьова сила та лінійна швидкість подачі РО;  $S_{1+2}$  – результуюче (абсолютне) переміщення РО;  $F_{o,PO}$  – сумарна сила опору від дії РО верстата, що приведена до осі ХГ.

Систему рівнянь руху двоканального ЕП МП з ОХГ побудуємо за умови абсолютної жорсткості кінематичних ланцюгів та нехтування моменту інерції сполучної муфти СМ.

$$S_{PO}(t) \equiv S_{1+2}(t) = S_1(t) + \text{sign}\varphi_{Д2} \cdot S_2(t) = \frac{t_r}{2\pi} \left[ \frac{\varphi_{Д1}(t)}{t_1} + \text{sign}\varphi_{Д2} \cdot \frac{\varphi_{Д2}(t)}{t_{ОХГ}} \right]; \quad (1)$$

$$\varphi_{\text{вв},\text{ОХГ}}(t) \equiv \varphi_{\text{вв},\text{РО},\text{ОХГ}}(t) = C_{ХГ}^{-1} S_{PO}(t) = \frac{2\pi}{t_r} S_{PO}(t); \quad (2)$$

$$F_{PO,\text{ОХГ}}(t) \equiv F_{1+2}(t) = F_1(t) + \text{sign}\varphi_{Д2} \cdot F_2(t) = C_{ХГ}^{-1} \eta_{\text{ОХГ}} M_{PO,\text{ОХГ}}(t) = \frac{2\pi \eta_{\text{ОХГ}} M_{PO,\text{ОХГ}}(t)}{t_r}; \quad (3)$$

$$M_{PO,\text{ОХГ}}(t) = M_{PO,\text{Д1},\text{ОХГ}}(t) + \text{sign}\varphi_{Д2} \cdot M_{PO,\text{Д2},\text{ОХГ}}(t) = i_1 \eta_1 \eta_r M_{Д1}(t) + \text{sign}\varphi_{Д2} \cdot i_{\text{ОХГ}} \eta_{\text{н.с}} M_{Д2}(t); \quad (4)$$

$$F_{PO,\text{ОХГ}}(t) - m'_{PO,\text{ОХГ}} p^2 S_{PO}(t) - F'_{o,\Sigma,\text{ОХГ}} \cong 0, \quad F'_{o,\Sigma,\text{ОХГ}} = C_{ХГ}^{-1} \eta_{\text{ОХГ}} M'_{o,\Sigma,\text{ОХГ}} = \frac{2\pi \eta_{\text{ОХГ}} M'_{o,\Sigma,\text{ОХГ}}}{t_r}; \quad (5)$$

$$M'_{p,1,\text{ОХГ}} = M'_{o,PO,\text{ОХГ}} + M'_{o,ГП,\text{ОХГ}}; \quad M'_{p,2,\text{ОХГ}} = M'_{o,PO,\text{ОХГ}} + M'_{o,\text{ОХГ}}; \quad (6)$$

$$\begin{cases} M_{Д1}(t) - J'_{\Sigma,Д1} p^2 \varphi_{Д1}(t) - \text{sign}\varphi_{Д2} \cdot \frac{J'_{PO,\text{ОХГ}}}{i_1^2 \eta_1 \eta_r \eta_{\text{ОХГ}}} p^2 \varphi_{Д2}(t) - M'_{o,\text{ОХГ},Д1} \cong 0; \\ M_{Д2}(t) - J'_{ГП,Д2} p^2 \varphi_{Д2}(t) - \frac{J'_{PO,\text{ОХГ}}}{i_1^2 \eta_1 \eta_r \eta_{\text{ОХГ}}} p^2 \varphi_{Д1}(t) - M'_{o,\text{ОХГ},Д2} \cong 0, \end{cases} \quad (7)$$

де  $M'_{o,\text{ОХГ},Д1} = \frac{1}{i_1 \eta_1 \eta_r} (M'_{o,PO,\text{ОХГ}} + M'_{o,ГП,\text{ОХГ}})$ ;  $M'_{o,\text{ОХГ},Д2} = \frac{1}{i_{\text{ОХГ}} \eta_{\text{н.с}}} (M'_{o,PO,\text{ОХГ}} + M'_{o,\text{ОХГ}})$ ;  $(8)$

$$M'_{o,PO,\text{ОХГ}} = \begin{cases} M_{\text{тр.п.РО}} = \frac{[m'_{PO,\text{ОХГ}} g f_{\text{тр.РО.с}} + F_{\text{нат.ХГ}}] t_r}{2\pi \eta_{\text{ОХГ}}} \text{ при рушанні з місця (пуску) привода подачі РО;} \\ M_{h,\text{рвз}} + M_{\text{тр.ков.РО}} + M_{h,\text{рвз}} = \frac{t_r}{2\pi \eta_{\text{ОХГ}}} [k_{\text{зап}} F_{h,0} + (m'_{PO,\text{ОХГ}} g - F_{h,0}) f_{\text{тр.РО.ков}}] \text{ при русі} \\ \text{РО з постійною (обмеженою) швидкістю в режимі торцевого фрезерування;} \end{cases} \quad (9)$$

$$J'_{\Sigma,Д1} = J'_{ГП,Д1} + \frac{J'_{PO,\text{ОХГ}}}{i_1^2 \eta_1 \eta_r \eta_{\text{ОХГ}}}; \quad (10)$$

$$\text{sign}\varphi_{Д2} = \begin{cases} +1 \text{ при узгодженому обертанні двигунів Д2 і Д1,} \\ -1 \text{ при зустрічному обертанні двигунів Д2 і Д1;} \end{cases} \quad (11)$$

$m'_{PO,\text{ОХГ}}$  і  $J'_{PO,\text{ОХГ}}$  – результуючі маса та момент інерції РО, що приведені відповідно до поступального та обертального рухів ОХГ;

$$m'_{PO,\text{ОХГ}} = m'_{\text{сан}} + m'_{\text{р.ст}} + m'_{\text{вир}}; \quad J'_{PO,\text{ОХГ}} = r^2 m'_{PO,\text{ОХГ}} = \left( \frac{V_{\text{ОХГ}}^*}{\omega_{\text{вв},\text{ОХГ}}^*} \right)^2 m'_{PO,\text{ОХГ}} = \left( \frac{t_r}{2\pi} \right)^2 m'_{PO,\text{ОХГ}}; \quad (12)$$

$\varphi_{\text{вв},\text{ОХГ}}(t)$  – результуючий кут повороту ОХГ;  $F_{PO,\text{ОХГ}}(t)$  і  $M_{PO,\text{ОХГ}}(t)$  – результуючі сила подачі та обертовий момент, що створюються дводвигунним ПМ на РО й діють на ОХГ;  $M_{PO,\text{Д1},\text{ОХГ}}(t)$  і  $M_{PO,\text{Д2},\text{ОХГ}}(t)$  – обертові моменти двигунів Д1 і Д2 на різьбленні ОХГ, що створюються гвинтовою передачею (ГП);  $F'_{o,\Sigma,\text{ОХГ}}$  і  $M'_{o,\Sigma,\text{ОХГ}}$  – приведені до поступального й обертального руху ОХГ сталі результуючі сила опору й реактивний момент навантаження;  $M'_{p,1,\text{ОХГ}}$  і  $M'_{p,2,\text{ОХГ}}$  – сталі сумарні реактивні моменти на різьбленні ОХГ у результаті роботи двигунів Д1 і Д2 у режимі металообробки;  $M'_{o,\text{ОХГ},Д1}$  і  $M'_{o,\text{ОХГ},Д2}$  – сталі сумарні моменти опору на різьбленні ОХГ, приведені до валів ВД Д1 і Д2 за їхньої спільної роботи в режимі металообробки;  $i_1$ ,  $i_{\text{ОХГ}}$ ,  $\eta_1$ ,  $\eta_r$ ,  $\eta_{\text{н.с}}$ ,  $\eta_{\text{ОХГ}}$  – передавальні числа та ККД елементів кінематичного ланцюга ПМ:  $i_1 = 1$ ,  $i_{\text{ОХГ}} = 3,321$ ,  $\eta_1 = 1$ ,  $\eta_r = 0,85$ ,  $\eta_{\text{н.с}} = 0,985$ ,  $\eta_{\text{ОХГ}} = 0,95$ ;  $p \triangleq d/dt$  – оператор диференціювання;  $M'_{o,PO,\text{ОХГ}}$  – сумарний момент опору на різьбленні ОХГ від дії сил тертя ковзання опор робочого столу по напрямних станини та складових сили різання  $F$ ;  $F_{h,0}$  та  $F_{x,0}$  – горизонтальна та вертикальна складові миттєвої сили різання  $F$  за торцевого фрезерування;  $M'_{o,ГП,\text{ОХГ}}$  – сумарний момент опору на різьбленні ОХГ від дії сил тертя у ГП «ХГ-ОХГ», що визначається тертям у ШПП та у підшипниках опор ХГ (за наявності попереднього натягу  $F_{\text{нат.ХГ}}$  в ГП);  $M'_{o,\text{ОХГ}}$  – сумарний момент опору на різьбленні ОХГ від дії сил тертя у ШПП та у підшипниках опор ОХГ (за наявності попереднього натягу в ОХГ);  $V_{\text{ОХГ}}^*$  та  $\omega_{\text{вв},\text{ОХГ}}^*$  – абсолютні значення швидкості поступального та еквівалентного обертального рухів ОХГ;  $r$  – радіус приведення:  $r = C_{ХГ} = t_r/2\pi$ ;  $F_{\text{нат.ХГ}}$  – осьова сила на валу ХГ від попереднього натягу, створю-

ваного Д1;  $I'_{\Sigma, D1}$  і  $I'_{\Sigma, D2}$  – сумарні моменти інерції ПМ, приведені до валів двигунів Д1 і Д2 за їхньої спільної роботи;  $f_{тр, PO, c}$  і  $f_{тр, PO, ков}$  – коефіцієнти тертя спокою та тертя ковзання опор РО верстата;  $g$  – прискорення сили тяжіння.

Сумарна осьова сила подачі РО  $F_{\Sigma, h, OXГ}$  формується горизонтальною  $F_{h, 0}$  і вертикальною  $F_{x, 0}$  складовими сили різання  $F$  та силою тертя ковзання  $F_{h, тр, PO}$  опор РО і повинна враховувати нелінійні зміни зазначених складових залежно від зміни швидкості подачі РО у процесі металообробки, наприклад, фрезерування:

$$F_{\Sigma, h, OXГ} = F_{h, 0} - F_{x, 0} + F_{h, тр, PO} = F_{h, 0} + (m'_{PO, OXГ} g - F_{x, 0}) f_{тр, PO, ков}. \tag{13}$$

Моменти опору навантаження  $M'_{\phi, ГП, OXГ}$  і  $M'_{\phi, OXГ}$  в (6) і (8) можна визначити:

$$M'_{\phi, ГП, OXГ} = M'_{тр, гвинта, 1, OXГ} + M'_{тр, підш, 1, OXГ} = \frac{(0,022z_{\phi} + 2,21 \cdot 10^{-7} k_{п, в} d_{п, в}) F_{\Sigma, h, OXГ}}{2z_{\phi}}, \tag{14}$$

$$M'_{\phi, OXГ} = M'_{тр, гвинта, 2, OXГ} + M'_{тр, підш, 2, OXГ} = \frac{0,022z_{\phi} F_{\Sigma, h, OXГ}}{2z_{\phi}} + \frac{2,21 \cdot 10^{-7} k_{п, OXГ} d_{п, OXГ} F_{\Sigma, h, OXГ}}{2z_{\phi, OXГ}}, \tag{15}$$

де  $k_{п, в}$ ,  $k_{п, OXГ}$  і  $d_{п, в}$ ,  $d_{п, OXГ}$  – кількість і внутрішній діаметр підшипників в опорах ХГ і ОХГ.

У разі заданого значення швидкості подачі  $V_{PO, 0}$  величина  $F_{h, 0}$  визначається розрахунковим коефіцієнтом передачі  $K_{Fh, 0}(t_{p, 0}, V_{p, 0})$  і відповідним йому значенням коефіцієнта тертя різання  $\mu = \mu_0 = \mu(V_{p, 0})$ , що визначається за характеристикою тертя різання [9]; величина  $F_{x, 0}$  визначається коефіцієнтом пропорційності  $k_{xh}$  між еталонними силами  $F_{x, c}$  і  $F_{h, c}$ :

$$F_{h, 0} = F_{h, 0}(V_{p, 0}, V_{PO, 0}, \mu_0) = \mu_0 \cdot K_{Fh, 0}(t_{p, 0}, V_{p, 0}) V_{PO, 0} = \frac{\mu_0 \pi D_{\phi}^2 K_{Fp, 0}}{z_{\phi} V_{p, 0}} V_{PO, 0}, \tag{16}$$

$$F_{x, 0} \approx k_{xh} F_{h, 0}, \tag{17}$$

де  $V_{p, 0} = \pi D_{\phi} n_{ш, 0} / (6 \cdot 10^4)$ , м/с;  $t_{p, 0}$  – задана глибина різання, мм;  $K$  – нормативна питома сила різання під час фрезерування (окружна сила різання  $F_z$ , віднесена до розрахункової площі  $f_0$  шару, що зрізується одним зубом фрези);  $D_{\phi}$  – стандартний діаметр фрези;  $z_{\phi}$  – кількість зубів фрези.

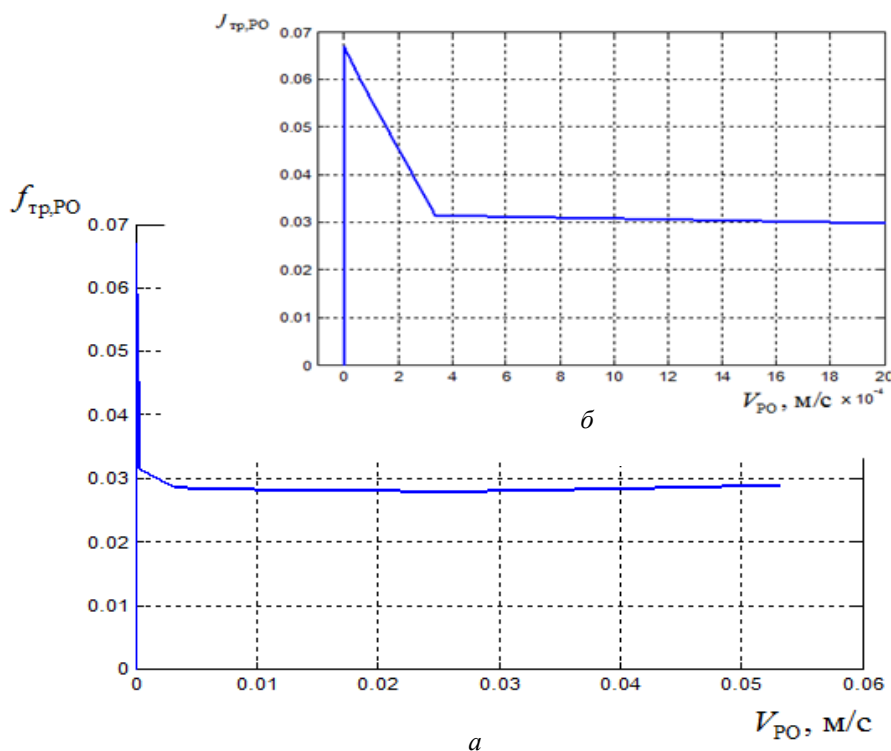
Урахування нелінійного характеру сил тертя ковзання в приводі опор РО поздовжньої подачі РО виконаємо, використовуючи графік лінеаризованої експериментальної залежності коефіцієнта тертя ковзання опор РО  $f_{тр, PO, ков}$  від швидкості подачі РО, зображений на рис. 2 у дрібному (а) та великому (б) масштабах.

У таблиці наведено уточнені розрахункові значення  $f'_{PO, i}$  ( $i = \overline{1, 8}$ ) коефіцієнта нахилу  $f'_{PO}$  характерних ділянок лінеаризованої кривої характеристики тертя ковзання в приводі опор РО  $f_{тр, PO, ков}(V_{PO})$ . Отримано зручні рекурентні співвідношення для розрахунку та моделювання апроксимованих значень коефіцієнта тертя ковзання  $f_{тр, PO, ков}$  залежно від заданої (усталеної) швидкості подачі РО:

$$f_{тр, PO, ков}(V_{PO}) = \begin{cases} f_{PO, 0} = 0 & \text{при } 0 \leq V_{PO, 0} \leq 1 \cdot 10^{-9} \text{ м/с;} \\ f_{PO, 1}(V_{PO, 1}) = f_{тр, PO, п} + f'_{PO, 1} V_{PO, 1}; \\ f_{PO, i}(V_{PO, i}) = f_{PO, i-1}(V_{PO, i-1, max}) + f'_{PO, i} V_{PO, i} \quad \forall i = \overline{2, 8}. \end{cases} \tag{18}$$

Швидкість подачі РО верстата $V_{PO, i}$ ( $i = \overline{1, 8}$ ), м/с	Коефіцієнт нахилу характеристики тертя ковзання $f'_{PO, i}$ ( $i = \overline{1, 8}$ )
$1 \cdot 10^{-9} < V_{PO, 1} \leq 6,72 \cdot 10^{-5}$	-116,0715
$6,72 \cdot 10^{-5} < V_{PO, 2} \leq 3,36 \cdot 10^{-4}$	-103,4226
$3,36 \cdot 10^{-4} < V_{PO, 3} \leq 3,2 \cdot 10^{-3}$	-0,9986
$3,2 \cdot 10^{-3} < V_{PO, 4} \leq 6,7 \cdot 10^{-2}$	-0,0721
$6,7 \cdot 10^{-2} < V_{PO, 5} \leq 1,33 \cdot 10^{-2}$	- 0,0345
$1,33 \cdot 10^{-2} < V_{PO, 6} \leq 3 = 2,67 \cdot 10^{-2}$	- 0,0135
$2,67 \cdot 10^{-2} < V_{PO, 7} \leq 3,33 \cdot 10^{-2}$	0,0405
$3,33 \cdot 10^{-2} < V_{PO, 8} \leq 5,33 \cdot 10^{-2}$	0,0416





**Рис. 2.** Графік лінеаризованої експериментальної залежності коефіцієнта тертя ковзання опор робочого органу  $f_{tr,PO,ков}$  від швидкості подачі робочого органу, у дрібному (а) та великому (б) масштабах

Уточнена структурно-алгоритмічна схема ітераційного двоканального компенсованого ЕП подачі з ОХГ та СПР-налаштуванням каналів керування (рис. 3) побудована за уточненою узагальненою математичною моделлю руху (1)...(17) і враховує вплив основних статичних моментів опору навантаження в процесі різання, а також вплив на динаміку подачі нелінійної сили тертя ковзання в МП РО верстата. На схемі моменти та сили опору об'єднані в блоках ФМН ОХГ (1) і ФМН ОХГ (2) – формувачів сумарних моментів опору навантаження на різьбленні ОХГ, що приведені до валів двигунів Д1 та Д2; пунктирними лініями спрощено вказані зв'язки, які забезпечують можливість послідовно-паралельного підключення уточнюючого каналу К-2 до роботи основного каналу К-1 для досягнення максимальної ефективності функціонування двоканального ЕП у зоні середніх та великих переміщень РО верстата ( $0,003 \text{ мм} < S_{PO} \leq 1600 \text{ мм}$ ).

На базі структурно-алгоритмічної схеми побудовано відповідну імітаційну комп'ютерну модель пропонованого двоканального та порівнюваного традиційного одноканального ЕП МП верстата, яка дає змогу провести порівняльний аналіз електродинамічних характеристик приводів за уточненою математичною моделлю (1)...(18) перш за все в зоні малих і середніх переміщень ( $0 < S_{PO} \leq 1 \text{ мм}$ ), де і необхідне досягнення особливо високої точності керування й позиціонування РО.

**Висновки.** 1. Отримано для поздовжньої подачі РО прецизійного металорізального верстата моделі 24К60АФ4 уточнену узагальнену математичну модель руху (1)...(17) двоканального ЕП МП з ОХГ у режимах металообробки, яка, крім основних статичних моментів опору навантаження в процесі різання, враховує також нелінійність характеристик сил тертя ковзання в МП РО.

2. За експериментальними даними побудовано графік кусково-лінеаризованої залежності коефіцієнта тертя ковзання опор РО  $f_{tr,PO,ков}$  від швидкості подачі РО, який представлено зручними рекурентними співвідношеннями (18) для виконання розрахунків та моделювання характерних ділянок лінеаризованої характеристики  $f_{tr,PO,ков}(V_{PO})$ .

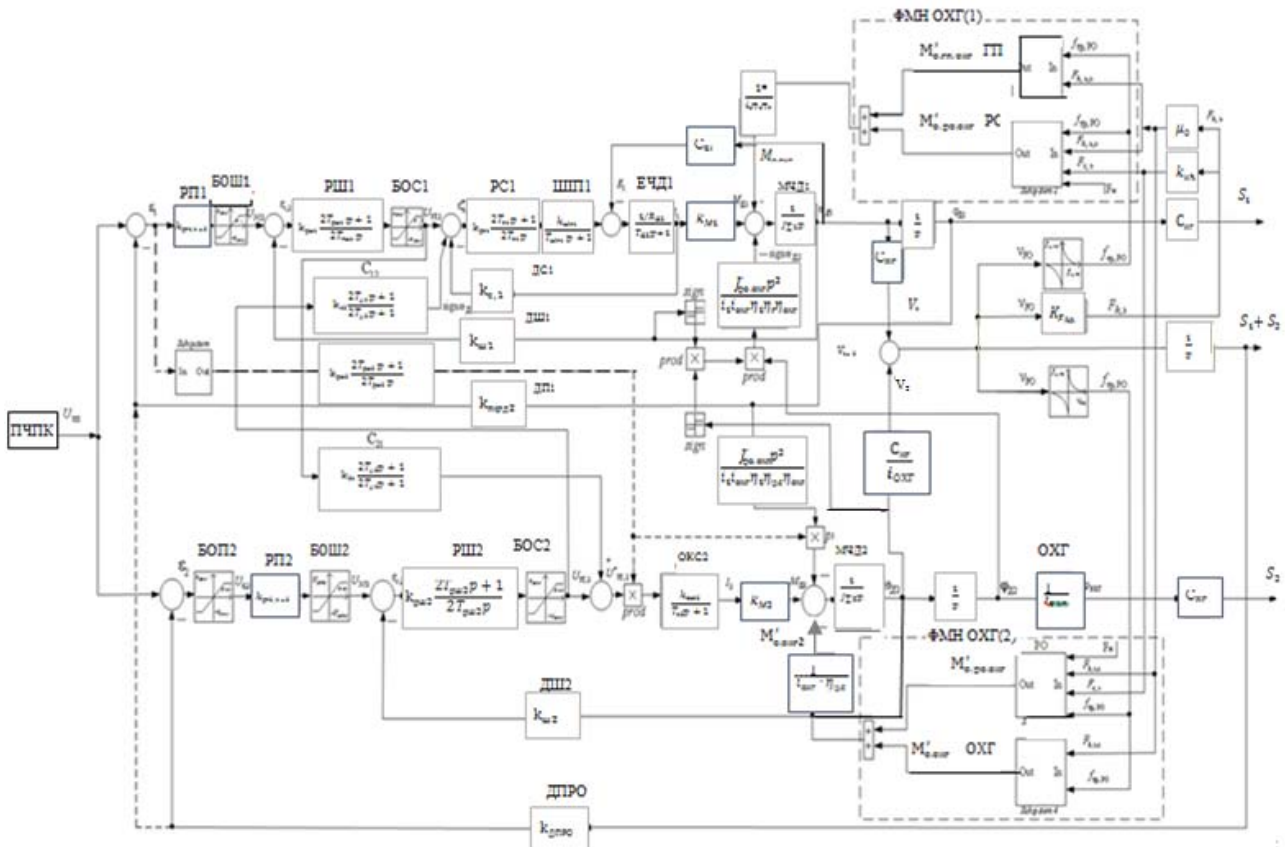


Рис. 3. Уточнена структурно-алгоритмічна схема ітераційного двоканального компенсованого електропривода подачі з обортовою ходовою гайкою та СПР-налаштуванням каналів керування

3. За математичною моделлю (1)...(18) побудовано уточнену структурно-алгоритмічну схему ітераційного двоканального компенсованого ЕП МП з ОХГ та СПР-налаштуванням каналів керування, яка дає змогу побудувати відповідну уточнену імітаційну комп'ютерну модель пропонуваного двоканального та традиційного одноканального ЕП подачі верстата для проведення порівняльного аналізу ефективності приводів.

1. Клепиков В.Б. Динамика электромеханических систем с нелинейным трением: монография. Х.: Підручник НТУ «ХПІ». 2014. 408 с.
2. Ito S., Steiniger J., Schitter G. Low-stiffness dual stage actuator for long range positioning with nanometer resolution. *Mechatronics*. 2015. Vol. 29. Pp. 46–56. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2015.05.007>
3. Huang W.-S., Liu C.-W., Hsu P.-L. and Yeh S.-S. Precision Control and Compensation of Servomotors and Machine Tools via the Disturbance Observer. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2010. Vol. 57. No. 1. Pp. 420-429. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2009.2034178>
4. Takanori Y. Experimental Study on Dynamic Behavior of High Precision Servo Motor for Machine Tools. *Applied Mechanics and Materials*. 2017. Vol. 863. Pp. 224–228. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.863.224>
5. Huang T., Kang Y., Du S. et al. A survey of modeling and control in ball screw feed-drive system. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2022. 121. Pp. 2923–2946. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-022-09506-4>
6. Клепиков В.Б., Худяев А.А., Поленок В.В. Итерационный двухканальный электропривод подачи для прецизионных станков и механизмов. *Технічна електродинаміка*. 2015. № 5. С. 26–35.
7. Khudiyayev O.A., Pshenychnykov D.O., Klepikov V.B. and Vorobiov B.V. Electrodynamics of high-precision iterative feed electric drive of machining center with inertial load. *Технічна електродинаміка*. 2023. № 3. С. 50–59. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2023.03.050>
8. Uzunoğlu E., Tatlıcioğlu E. and Dede M. A Multi-Priority Controller for Industrial Macro-Micro Manipulation. *Robotica*. 2021. 39(2). Pp. 217–232. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0263574720000338>
9. Анохина А.Ю. Исследование составляющих компонентов силы резания и силы трения при высокоскоростной механической обработке. URL: <http://masters.donntu.ru/2009/mech/anokhina/library/article8.htm>

**REFINED MODEL OF TWO-CHANNEL FEED ELECTRIC DRIVE WITH THE SUMMATION OF MOVEMENTS ON THE SLIDING NUT FOR HIGH-PRECISION METAL-CUTTING MACHINES****O.A. Khudiayev, V.M. Shamardina, D.O. Pshenichnikov**National Technical University Kharkiv Polytechnic Institute,  
Kirpichova str., 2, Kharkiv, 61002, Ukraine  
e-mail: [Vira.Shamardina@khpi.edu.ua](mailto:Vira.Shamardina@khpi.edu.ua)

The iterative two-channel feed electric drive (ED) with the summation of movements on the rotating sliding nut (RSN) is designed to increase the speed and accuracy of traditional single-channel ED feed mechanisms (FM) of metal-cutting machines with an inertial working tool (WT). A refined generalized mathematical model of movement of the two-channel ED with RSN was obtained, which was built for WT FM of the high-precision coordinate metal-cutting machine of the 24K60AФ4 model. The model takes into account the main static moments of resistance during metalworking, as well as the nonlinear nature of the sliding friction forces in the machine WT FM. Convenient recurrence relations are obtained for the calculation and modeling of sections of the linearized friction characteristic. The structural-algorithmic diagram of the compensated iterative two-channel feed ED with subordinate configuration of control channels is proposed, which makes it possible to compensate in steady-state conditions the negative impact on the accuracy of WT feed of the main static moments of resistance and nonlinearities of sliding friction forces in the drive load. Ref. 9, fig. 3, table.

**Keywords:** iterative two-channel feed electric drive, feed mechanism of the working tool, rotating sliding nut, generalized mathematical model of movement, nonlinear sliding friction forces.

1. Klepikov V.B. Dynamics of electromechanical systems with nonlinear friction: monograph. Kharkiv: Pidruchnyk NTU KhPI. 2014. (Rus)
2. Ito S., Steiniger J., Schitter G. Low-stiffness dual stage actuator for long range positioning with nanometer resolution. *Mechatronics*. 2015. Vol. 29. Pp. 46–56. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2015.05.007>
3. Huang W.-S., Liu C.-W., Hsu P.-L. and Yeh S.-S. Precision Control and Compensation of Servomotors and Machine Tools via the Disturbance Observer. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2010. Vol. 57. No. 1. Pp. 420–429. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2009.2034178>
4. Takanori Y. Experimental Study on Dynamic Behavior of High Precision Servo Motor for Machine Tools. *Applied Mechanics and Materials*. 2017. Vol. 863. Pp. 224–228. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.863.224>
5. Huang T., Kang Y., Du S. et al. A survey of modeling and control in ball screw feed-drive system. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2022. 121. Pp. 2923–2946. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-022-09506-4>
6. Klepikov V.B., Khudiayev A.A and Polenok V.V. Iterative two-channel electric feed drive for precision machines and mechanisms. *Tekhnichna Elektrodynamika*. No. 5. 2015. Pp. 26–35. (Rus)
7. Khudiayev O.A., Pshenichnikov D.O., Klepikov V.B. and Vorobiov B.V. Electrodynamics of high-precision iterative feed electric drive of machining center with inertial load. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2023. No. 3. Pp. 50–59. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2023.03.050>
8. Uzunoğlu E., Tatlıcioğlu E. and Dede M. A Multi-Priority Controller for Industrial Macro-Micro Manipulation. *Robotica*. 2021. 39(2). Pp. 217–232. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0263574720000338>
9. Anokhina A.Yu. Study of the components of cutting force and friction force in high-speed machining. (Rus) URL: <http://uran.donetsk.ua/~masters/2009/mech/anokhina/library/article8.htm>

Надійшла: 14.05.2024

Прийнята: 05.07.2024

Submitted: 14.05.2024

Accepted: 05.07.2024

УДК 621.316.9

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2024.68.050>

## ТЕСТУВАННЯ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ НА НЕСПРИЙНЯТЛИВІСТЬ ДО ПРОВАЛІВ НАПРУГИ, КОРОТКОЧАСНИХ ПЕРЕРИВАНЬ ТА ЗМІН НАПРУГИ

**А.В. Волошко\***, докт. техн. наук, **В.В. Шевчук\*\***

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,  
пр. Берестейський, 37, Київ, 03056, Україна  
e-mail: [vchevchuk1603@gmail.com](mailto:vchevchuk1603@gmail.com), [avolosko820@gmail.com](mailto:avolosko820@gmail.com)

*Розглядається тестування електрообладнання на несприйнятливості до провалів напруги, короточасних перерв та змін напруги. Особливу увагу приділено впливу точки початку провалу на чутливість електрообладнання, а також дослідженню стійкості електромагнітного реле до провалів напруги, стрибку фазового кута та точок початку і закінчення провалів. Аналізується механізм реагування електромагнітного реле на провал напруги, його чутливість до зміни частоти, наявності гармонічних спотворень та змін номінального значення напруги. Окремо розглядається симетрія чверті циклу щодо точки на хвилі. Бібл. 6, рис. 6.*

**Ключові слова:** провали напруги, короточасні перерви напруги, зміни напруги, електрообладнання, чутливість електрообладнання, електромагнітне реле, стрибок фазового кута, частота напруги, гармонічні спотворення, симетрія чверті циклу.

**Вступ.** Електрообладнання в сучасних електромережах часто піддається різним видам електромагнітних впливів, які можуть призвести до збоїв у його роботі. Провали напруги, короточасні перерви та зміни напруги є одними з найпоширеніших проблем, що впливають на стабільність роботи обладнання. Ці збої можуть призвести до серйозних фінансових втрат, зниження ефективності та навіть до аварійних ситуацій, що робить питання несприйнятливості електрообладнання до таких впливів надзвичайно актуальним.

Актуальність дослідження полягає в необхідності забезпечення надійної та безперебійної роботи електрообладнання в умовах, коли провали напруги, короточасні перерви та зміни напруги є неминучими. Це особливо важливо для критично важливих об'єктів, таких як медичні установи, виробничі підприємства та інші об'єкти інфраструктури, де будь-які збої можуть мати серйозні наслідки. Особлива увага приділяється аналізу впливу точки початку провалу на чутливість різних типів електрообладнання. Детальне дослідження стійкості електромагнітного реле включає механізм його реагування на провали напруги, а також вплив таких факторів, як зміна частоти, гармонічні спотворення та зміни номінального значення напруги. Окрему увагу приділено симетрії чверті циклу щодо точки на хвилі, яка має значний вплив на реакцію реле.

**Мета роботи.** Метою роботи є дослідження несприйнятливості електрообладнання до провалів напруги, короточасних перерв та змін напруги, а також визначення критичних параметрів, що впливають на стійкість та надійність роботи електрообладнання. Зокрема, досліджується вплив точки початку провалу на чутливість обладнання та стійкість електромагнітного реле до провалів напруги, стрибків фазового кута та гармонічних спотворень. Отримані результати сприятимуть розробці ефективних методів підвищення надійності та стабільності роботи електрообладнання в умовах нестабільного електропостачання.

**Результати досліджень.** Одним із ключових моментів визначення рівня ефективності впроваджених методів та засобів захисту електрообладнання є тестування електрообладнання на їхню несприйнятливості до провалів напруги, короточасних переривань та змін напруги. Це включає проведення серії тестів, які моделюють умови непередбачених втрат напруги та оцінюють реакцію обладнання на такі ситуації. Таке тестування дає змогу виявити потенційні проблеми та внести відповідні корективи в конструкцію або функціонування обладнання для забезпечення його надійності та стабільності в різних умовах електропостачання.



Згідно з ДСТУ EN IEC 61000-4-11:2022 [1] електрообладнання, яке використовується в системах електропостачання та електроспоживання, повинно пройти випробування на несприйнятливість до провалів напруги, короткочасних перерв та змін напруги перед введенням у промислову експлуатацію. Основні параметри таких випробувань включають глибину та тривалість провалів напруги [2].

Під час тестування електрообладнання піддається провалам напруги на рівнях 30, 60 і понад 95% нижче номінальної напруги. Тривалість провалів та перерв становить 10 мс, 100 мс і 5000 мс відповідно. Для кожного рівня тестування проводяться п'ять провалів зі швидкістю один провал на хвилину. Зміна напруги живлення здійснюється при переході напруги через нуль, а номінальна напруга використовується як основа для визначення рівня випробувальної напруги.

У сучасних електроенергетичних системах важливим показником, який визначає стійкість та надійність електрообладнання, є точка початку провалу (POI) та його закінчення (POW) [3]. Цей термін описує випадки, коли напруга знижується нижче нормального рівня на певний час, що може варіюватися від кількох мілісекунд до кількох секунд. Початок провалу може виникати через різні причини, такі як перевантаження мережі, зміни навантаження, короткі замикання або викиди. Під час таких подій напруга в мережі може раптово знижуватися, що може мати значний вплив на електрообладнання. Особливо критичним це явище є для чутливих пристроїв, таких як комп'ютери, медичне обладнання або обладнання з автоматичним управлінням. Наприклад, медичне обладнання може зазнати серйозних проблем, якщо напруга падає під час критичних процедур, що спричинить небезпечні наслідки для пацієнтів.

Важливість точного визначення точки початку провалу напруги підкреслюється в багатьох стандартах та науково-технічній літературі. Наприклад, дослідження показують, що для деяких застосувань, таких як відключення електромеханічного контактора, фазовий кут, при якому починається падіння напруги, є важливою характеристикою, відомою як точка на хвилі. Обладнання може бути чутливим до точки ініціації під час провалу, а як точка початку, так і точка завершення провалу можуть впливати на роботу пристроїв з активним керуванням, які залежать від синхронізації з формою сигналу. Розглянемо основні аспекти впливу точки початку провалу на чутливість електрообладнання.

#### *Тип обладнання.*

Чутливе обладнання, таке як комп'ютери, медичне обладнання або системи автоматичного управління, особливо вразливе до змін напруги. Раптове зниження напруги може призвести до їхнього вимкнення або пошкодження. Електромеханічні пристрої, такі як двигуни, реле та контактори, також можуть зазнавати збоїв під час провалів напруги. За таких умов вони втрачатимуть потужність або працюватимуть неправильно, що спричинить зупинку виробничих процесів.

#### *Тривалість провалу.*

Короткочасні провали (менше 4-5 циклів) зазвичай викликають менше проблем, ніж довші. Проте навіть короткочасні провали можуть бути критичними для дуже чутливих пристроїв. Довші провали (більше 5 циклів) можуть призвести до значних проблем в роботі обладнання включно з повною зупинкою або пошкодженням.

#### *Фазовий кут.*

Фазовий кут, при якому починається провал, також впливає на чутливість обладнання. Наприклад, випробування показали, що провали напруги, які починаються з точкою  $90^\circ$ , можуть бути більш шкідливими для деяких типів обладнання, ніж провали з точкою  $0^\circ$ . Обладнання, яке залежить від точної синхронізації з електричною хвилею, особливо вразливе до змін фазового кута.

#### *Реакція обладнання.*

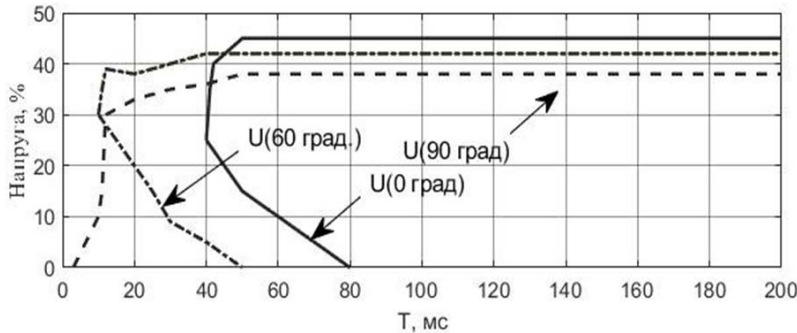
Обладнання з активним керуванням, яке використовує інформацію про синхронізацію з формою сигналу, може зазнавати збоїв як на початку, так і в кінці провалу напруги. Деякі пристрої, такі як двигуни постійного струму, що використовують керовані тиристори, особливо вразливі до таких змін.



Для забезпечення надійності роботи рекомендується перевіряти реле, пускачі двигунів і контактори з різними точками початку провалу, зокрема з точкою  $0^\circ$ , оскільки більшість провалів триває від 5 до 30 циклів.

Проаналізувавши результати досліджень, представлених в [4], з'ясовано, що положення точки початку провалу суттєво впливає на чутливість контакторів котушки змінного струму до провалів напруги (рис. 1).

Як показано на рис. 1, контактор більш чутливий до глибоких провалів напруги з фа-



**Рис. 1.** Чутливість контакторів котушок змінного струму до провалів та переривань напруги (без зсуву фази)

зовим кутом  $90^\circ$ , ніж до аналогічних провалів з фазовим кутом  $0^\circ$ . Також видно, що різниця в чутливості максимальна для коротких переривань, де час спрацювання/відновлення контактора коливається від кількох мс для провалу напруги з  $90^\circ$  фазовим кутом та понад 80 мс для  $0^\circ$  фазового кута.

Дослідження стійкості електромагнітних реле (ЕМР) до провалів напруги є

важливим аспектом забезпечення надійності електричних систем. Провали напруги, стрибки фазового кута, а також точки початку та закінчення провалів впливають на роботу реле і можуть призводити до збоїв в їхньому функціонуванні.

Провали напруги виникають при зниженні напруги в мережі на короткий час, зазвичай від кількох мілісекунд до кількох секунд. Вони можуть бути спричинені різними факторами включно з короткими замиканнями, перевантаженням або змінами в навантаженні. Електромагнітні реле можуть бути чутливими до таких провалів, що може призвести до їхнього неправильного спрацювання або навіть пошкодження.

Фазовий кут визначає момент часу в електричному циклі, при якому починається провал напруги. Стрибки фазового кута можуть впливати на чутливість реле до провалів напруги. Дослідження показують, що реле більш чутливі до провалів напруги, які починаються з певним фазовим кутом, наприклад, з  $90^\circ$ , ніж до провалів, які починаються з фазовим кутом  $0^\circ$ . Це пов'язано з тим, що різні фазові кути впливають на струми, що проходять через реле, по-різному.

Точки початку та закінчення провалів також мають значний вплив на роботу реле. Точка початку провалу визначає, коли напруга починає знижуватися, а точка закінчення — коли напруга повертається до нормального рівня. Реле можуть бути чутливими до обох цих моментів, і їхнє неправильне спрацювання може відбуватися як на початку, так і в кінці провалу. Випробування показують, що реле можуть реагувати по-різному на провали напруги з різними точками початку й закінчення.

Дослідження стійкості електромагнітних реле до провалів напруги включають лабораторні випробування, під час яких реле піддаються провалам напруги з різними фазовими кутами і тривалістю. Випробування показали, що короткочасні провали (менше 4-5 циклів) зазвичай мають менший вплив на реле, ніж довші провали. Однак навіть короткочасні провали можуть викликати серйозні проблеми для особливо чутливих реле.

Важливим висновком досліджень є те, що більшість провалів напруги тривають від 5 до 30 циклів. Таким чином, рекомендується проводити випробування реле з точками початку провалу при  $0^\circ$  та інших фазових кутах для визначення їхньої стійкості до провалів напруги.

Механізм реагування електромагнітного реле на провал напруги базується на його основному принципі дії, що використовує електромагнітне поле для керування перемиканням контактів. Коли через котушку ЕМР проходить електричний струм, утворюється магнітне поле, яке впливає на магнітний сердечник.



Під час провалу напруги, коли електричний струм або напруга знижуються нижче певного рівня, струм через котушку ЕМР також може зменшитися або зовсім зникнути. Це призводить до втрати магнітного поля, яке утримувало контакти в потрібному стані. Унаслідок цього магнітний сердечник може змінити своє положення під дією пружини або іншого механізму, що призведе до зміни стану контактів. Це може викликати відкриття або закриття електричного кола залежно від конфігурації ЕМР.

Електромеханічні реле функціонують на основі впливу магнітного поля нерухомої обмотки зі струмом на рухомий феромагнітний елемент (якір). Коли подається синусоїдальне живлення змінного струму, основний потік котушки змінного струму змінюється синусоїдально з часом, що впливає на магнітний сердечник і відповідно на перемикання контактів. На рис. 2 показано форми сигналів – електромагнітної сили та сили пружини.

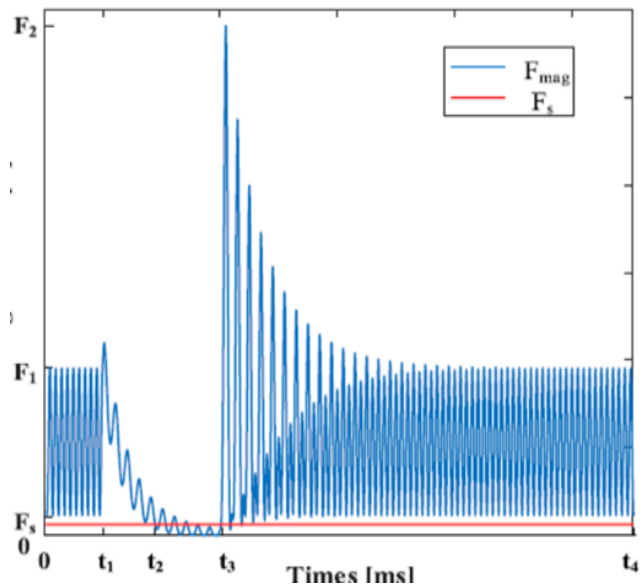


Рис. 2. Криві електромагнітної сили ( $F_{mag}$ ) і сили пружини ( $F_s$ ) під час провалу напруги

Перед початком провалу магнітна сила ( $F_{mag}$ ) перевищує силу пружини ( $F_s$ ), і електромагнітне реле (ЕМР) працює нормально. Коли провал відбувається в момент часу  $t_1$ ,  $F_{mag}$  поступово зменшується; проте  $F_{mag}$  все ще перевищує  $F_s$  до часу  $t_2$ , і ЕМР продовжує працювати нормально від  $t_1$  до  $t_2$ .  $F_{mag}$  стає меншим за  $F_s$  з моменту  $t_2$ , і ЕМР відключається з  $t_2$  до  $t_3$ . Зниження напруги закінчується в  $t_3$ , і ЕМР відновлює нормальну роботу. Це відбувається, коли величина провалу напруги перевищує певний рівень, а  $F_{mag}$  залишається вищим за  $F_s$  незалежно від тривалості провалу, що дає змогу ЕМР працювати стабільно. Іншими словами, для забезпечення нормальної роботи ЕМР під час провалу напруги  $F_{mag}$  має бути більше  $F_s$ . Тому необхідно знати та кількісно визначити толерантність ЕМР до падіння напруги.

Крім того, різні параметри форми хвилі (POW) та амплітудно-частотні характеристики (PAJ) впливають на основний потік ЕМР, що зі свого боку впливає на зміну  $F_{mag}$ . Це означає, що POW і PAJ можуть впливати на сприйнятливості ЕМР до провалів напруги, тому при тестуванні ЕМР ці характеристики потрібно враховувати.

З рис. 3 а видно, що зображений сигнал має провал напруги з тривалістю 18 мс, і в

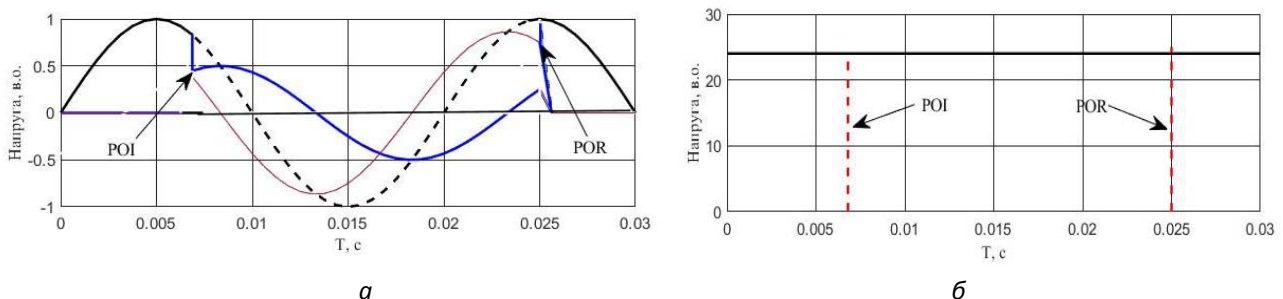


Рис. 3. Провал напруги з тривалістю 18 мс та крива спрацювання ЕМР

цьому випадку реле не спрацює (рис. 3 б). Зазвичай реле витримує тривалість провалу від 20 до 25 мс перед спрацюванням. Провал напруги тривалістю 18 мс може бути спричинений різними факторами, такими як короточасне перевантаження або імпульсне навантаження.

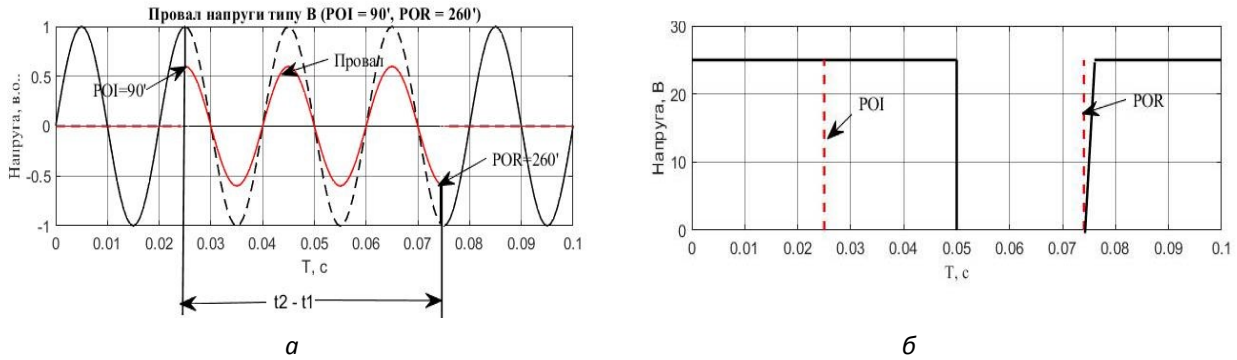


Рис. 4. Провал напруги з тривалістю 49 мс та крива спрацювання ЕМР

При провалі напруги тривалістю 49 мс (рис. 4 а) реле спрацює через 25 мс після початку провалу (точка POI). Напруга живлення навантаження знижується до 0 В, і після відновлення напруги (точка POR) реле продовжує свою роботу.

Провал напруги тривалістю 49 мс може бути серйознішим інцидентом, який може виникнути через більші перевантаження або навіть коротке замикання. Результати цього тесту показують, що чим довша тривалість провалу, тим більша ймовірність відключення ЕМР.

Чутливість електромагнітного реле до змін частоти, наявності гармонічних спотворень та коливань номінальної напруги є ключовими для його ефективної роботи в електричних системах. Частотні зміни можуть виникати через різні причини, такі як некоректна синхронізація джерел живлення або помилки в роботі генераторів. Чутливість ЕМР до таких змін полягає в здатності своєчасно реагувати на частотні коливання, забезпечуючи надійне включення або вимкнення електричного кола.

Зміни номінальної напруги можуть бути спричинені флуктуаціями в електричних мережах або перенапругами. Чутливість ЕМР до таких змін полягає в здатності адаптуватися до навантаження і витримувати відповідні зміни напруги, забезпечуючи стабільну роботу електричних систем. Тестування стійкості ЕМР проводилося за наявності прямокутних провалів [6].

Було проведено тестування стійкості ЕМР до провалів зі зміною частоти на  $\pm 2\%$ . Частотні провали розглядалися при значеннях 49, 50 і 51 Гц. Зміна частоти на  $\pm 2\%$  від номінальної не впливає на чутливість тестованих ЕМР, оскільки їхні характеристики були майже ідентичні при всіх трьох частотах. Так як криві допустимих відхилень напруги для POW із фазовим кутом 0, 180 та  $360^\circ$  близькі між собою, а для  $90$  та  $270^\circ$  майже однакові, чутливість ЕМР показана на рис. 5 та 6 тільки для POW між 0 та  $90^\circ$ .

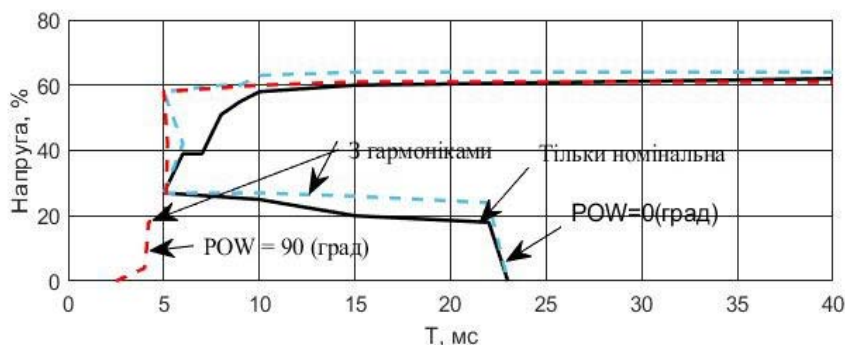
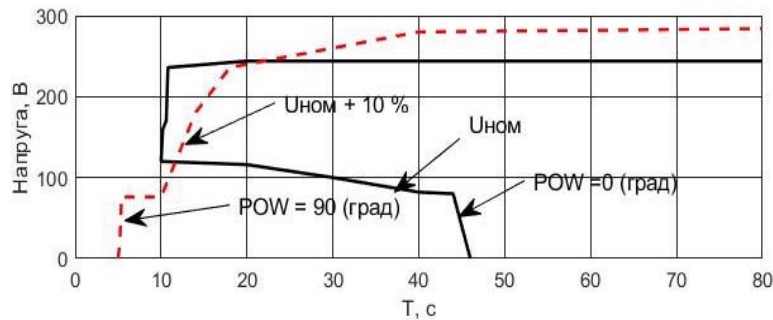


Рис. 5. Криві допустимих відхилень напруги за відсутності стрибка фазового кута та наявності гармонік

Результати тестування стійкості електромагнітного реле (ЕМР) за умов номінальної напруги та наявності спотворень вказують на його залежність від характеристик POW (POI, POR). Стійкість ЕМР незначно вища за наявності гармонік. Це означає, що ефективність роботи реле може змінюватися залежно від потужності сигналу, що надходить до нього.

Коли ми збільшуємо номінальну напругу на 10 %, стійкість ЕМР трохи збільшується і залежить від POW. Це свідчить про те, що при підвищенні напруги ефективність реле може варіюватися залежно від потужності сигналу, що подається (рис. 6).



**Рис. 6.** Криві допустимих відхилень напруги за підвищення напруги на 10 %

**Висновки.** У статті було проведено всебічне тестування електрообладнання на несприйнятливості до провалів напруги, короткочасних перерв та змін напруги. Особливу увагу приділено впливу точки початку провалу на чутливість обладнання, а також стійкості електромагнітного реле до провалів напруги, стрибків фазового кута та моментів початку й закінчення провалів. Результати дослідження показали, що електромагнітні реле мають певну чутливість до зміни частоти, наявності гармонічних спотворень та змін номінального значення напруги. Також було досліджено вплив симетрії чверті циклу щодо точки на хвилі на роботу реле.

Встановлено, що реле демонструють стабільну роботу при номінальній напрузі, але їхня ефективність може змінюватися за наявності спотворень або підвищення напруги. Це підкреслює важливість урахування потужності сигналу при оцінці стійкості електромагнітного реле до різних електромагнітних впливів.

Дослідження підтверджує, що забезпечення надійної та безперебійної роботи електрообладнання в умовах провалів напруги, короткочасних перерв та змін напруги є критично важливим, особливо для об'єктів із високими вимогами до надійності, таких як медичні установи та виробничі підприємства. Результати дослідження можуть бути використані для вдосконалення методів захисту електрообладнання від електромагнітних впливів, що сприятиме підвищенню загальної стабільності та ефективності роботи електричних систем.

1. ДСТУ EN IEC 61000-4-11:2022 Електромагнітна сумісність. Частина 4-11. Методики випробування та вимірювання. Випробування на несприйнятливості до провалів напруги, короткочасних переривань та змінень напруги для обладнання з силою вхідного струму до 16 А на фазу.
2. IEEE Trial-Use Recommended Practice for Voltage Sag and Short Interruption Ride-Through Testing for End-Use Electrical Equipment Rated Less than 1000 V., IEEE STD 1668–2014, 2014. Pp. 1–92.
3. Волошко А.В., Шевчук В.В. Провали напруги в електричних мережах та визначення їхніх характеристик. Вісник ВПІ. Вип. 5. 2023. С. 12–17. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2023-170-5-12-17>
4. Djokic, S.Z., Milanovic, J.V. and Kirschen, D.S. Sensitivity of AC Coil Contactors to Voltage Sags, Short Interruptions, and Under-Voltage Transients. IEEE Transaction on Power Delivery, 2004. 19. Pp. 1299–1307.
5. Bollen, M.H., 2000. Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions. 1st Edn., Wiley, New York, ISBN-10: 0780347137, 543 p.
6. Huaying Zhang, Qing Wang, Yihong You. Tolerance of Electromagnetic Relay to Voltage Sags and Short Interruptions. Frontiers in Energy Res. December 2021. Vol. 9. Article 766472. DOI: <https://orcid.org/10.3389/fenrg.2021.766472>

## TESTING OF ELECTRICAL EQUIPMENT FOR IMMUNITY TO VOLTAGE FAILURES, SHORT-TERM INTERRUPTIONS AND VOLTAGE CHANGES

A.V. Voloshko, V.V. Shevchuk

National Technical University of Ukraine Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute,  
Beresteiskyyi ave., 37, 03056, Kyiv, Ukraine

e-mail: [vchevchuk1603@gmail.com](mailto:vchevchuk1603@gmail.com), [avolosko820@gmail.com](mailto:avolosko820@gmail.com)

*The article examines the testing of electrical equipment for immunity to voltage dips, short-term interruptions, and voltage changes. Special attention is paid to the influence of the starting point of the dip on the sensitivity of electrical equipment, as well as to the study of the resistance of the electromagnetic relay to voltage dips, phase angle jumps, and the starting and ending points of dips. The reaction mechanism of the electromagnetic relay to a voltage drop, its sensitivity to a change in frequency, the presence of harmonic distortions and changes in the nominal value of the voltage are analyzed. The symmetry of a quarter cycle with respect to a point on the wave is considered separately. Ref. 6, fig. 6.*

**Key words:** voltage dips, short-term voltage interruptions, voltage changes, electrical equipment, sensitivity of electrical equipment, electromagnetic relay, phase angle jump, voltage frequency, harmonic distortion, quarter-cycle symmetry.

1. DSTU EN IEC 61000-4-11:2022 Electromagnetic compatibility. Part 4-11. Test and measurement methods. Testing for immunity to voltage dips, short-term interruptions and voltage changes for equipment with an input current of up to 16 A per phase.
2. IEEE Trial-Use Recommended Practice for Voltage Sag and Short Interruption Ride-Through Testing for End-Use Electrical Equipment Rated Less than 1000 V., IEEE STD 1668–2014, 2014. Pp. 1–92.
3. Voloshko A.V., Shevchuk V.V. Voltage dips in electrical networks and determination of their characteristics. *Visnyk VPI*, Vol. 5. 2023. Pp. 12–17. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2023-170-5-12-17>
4. Djokic, S.Z., Milanovic, J.V. and Kirschen, D.S. Sensitivity of AC Coil Contactors to Voltage Sags, Short Interruptions, and Under-Voltage Transients. *IEEE Transaction on Power Delivery*. 2004. 19. Pp. 1299–1307.
5. Bollen, M.H., 2000. *Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions*. 1st Edn., Wiley, New York, ISBN-10: 0780347137, 543 p.
6. Huaying Zhang, Qing Wang, Yihong You. Tolerance of Electromagnetic Relay to Voltage Sags and Short Interruptions. *Frontiers in Energy Res.* December 2021. Vol. 9. Article 766472. DOI: <https://orcid.org/10.3389/fenrg.2021.766472>

Надійшла: 03.08.2024

Прийнята: 27.08.2024

Submitted: 03.08.2024

Accepted: 27.08.2024

## ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА РИНКИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

УДК 0001.3

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2024.68.057>

### АНАЛІЗ СТАТИСТИЧНИХ ДАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ ЗАВЕРШЕНИХ РОБІТ У ГАЛУЗІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКИ В УСТАНОВАХ ВІДДІЛЕННЯ ФІЗИКО-ТЕХНІЧНИХ ПРОБЛЕМ ЕНЕРГЕТИКИ НАН УКРАЇНИ

О.В. Кириленко<sup>1\*</sup>, акад. НАН України, Л.Г. Лобунець<sup>2\*</sup>

1 – Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна

2 – ДУ «Інститут досліджень науково-технічного потенціалу та історії науки ім. Г.М. Доброва НАН України»,

б-р Т. Шевченка, 60, Київ, 01032, Україна

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

*Розглянуто актуальну проблему моніторингу результатів наукових досліджень та збору даних, необхідних для формування політики розвитку пріоритетних напрямів науки, технологій та інновацій. Проведено аналіз розвитку досліджень за напрямком «електроенергетика» в установах Відділення фізико-технічних проблем енергетики НАН України за період з 1995 по 2021 рік. Наведено показники фінансування цих досліджень протягом розглянутого періоду, зроблено висновок, що щораз більше їхнє фінансування на фоні спадного тренду загальних витрат на науку свідчить про пріоритетність цього напрямку для народного господарства країни. Бібл. 12, рис. 6.*

**Ключові слова:** моніторинг наукових досліджень, електроенергетика, Відділення фізико-технічних проблем енергетики НАН України.

**Вступ.** Проведення системного моніторингу та аналіз результативності наукових досліджень є основним джерелом інформації, необхідної для визначення стану та формування виваженої державної політики розвитку пріоритетних напрямів науки, технологій та інновацій. Така робота проводиться розпорядниками бюджетних коштів різних рівнів – від Кабінету Міністрів України та галузевих міністерств до кінцевих виконавців, що забезпечує необхідну деталізацію результатів досліджень та оцінку їхньої відповідності пріоритетним напрямкам розвитку. Енергетика є однією з найбільш наукоємних галузей народного господарства; значну частину наукових досліджень для цієї галузі виконують установи Національної Академії наук України. Починаючи з 1995 р., в НАН України провадиться моніторинг результатів досліджень, що виконуються в установах Відділення фізико-технічних проблем енергетики НАН України. Сформований масив інформації дає змогу здійснювати аналіз тенденцій розвитку досліджень у різних напрямках енергетики та оцінювати їхню відповідність цілям державної політики в галузі. У цій статті на основі даних моніторингу проведено аналіз розвитку досліджень за напрямком «електроенергетика» протягом останніх 25 років.

**Сучасний стан проблеми.** Основним завданням системи управління наукою є розробка рішень, що посилюють вплив наукових досліджень на вирішення найактуальніших соціальних та екологічних проблем світу. Головним інструментом такого управління є впливове інвестування, яке базується на таких принципах [1]:

1. **Цілеспрямованість**, що визначається метою, спрямованою на досягнення визначених соціальних чи екологічних результатів. У наш час головним індикатором відповідності цьому принципу є узгодження з глобальними Цілями сталого розвитку (ЦСР 2015) [2], якими оголошено новий план дій з метою виведення світу на траєкторію сталого та життєстійкого розвитку.





2. **Використання доступних даних.** Інвестиції не можна планувати на основі передчуттів, для інвестування впливу потрібно використовувати доступні докази та дані, щоб керувати проектом інвестицій, який буде соціально та екологічно корисним.

3. **Управління впливом ефективності.** Впливове інвестування має певний намір і вимагає, щоб інвестиції керувалися відповідно до цього наміру. Це включає наявність системи зворотного зв'язку та передачу інформації про ефективність, щоб допомогти іншим учасникам інвестиційного ланцюга керувати досягненням впливу.

Базою для виконання двох останніх завдань у галузі науки є моніторинг результатів наукових досліджень та експериментальних розробок. Цю роботу для програми ЦСР 2015 виконує Інститут статистики ЮНЕСКО (UIS.Stat), що розробив відповідну методику та надає інформацію, необхідну для визначення важливих індикаторів виконання завдань цілей сталого розвитку, [3]. Відповідно до Цілі сталого розвитку 9 (ЦСР-9) країни зобов'язалися «будувати стійку інфраструктуру, сприяти інклюзивній та сталій індустріалізації та сприяти інноваціям». Зокрема, завдання 9.5 закликає їх заохочувати інновації та суттєво збільшувати кількість дослідників, а також державні та приватні витрати на дослідження та експериментальні розробки (НДДКР). Для моніторингу цієї цілі застосовуються два показники: витрати на НДДКР як частка ВВП і кількість дослідників (в еквіваленті повної зайнятості) на 1 мільйон жителів. Обидва індикатори розробляє UIS, який має часові ряди даних приблизно за 50 років, щоб відстежувати тенденції з часом. Щоб краще відобразити наскрізний характер науки, технологій та інновацій (НТІ) у всіх ЦСР, UIS співпрацює з країнами та партнерами над розробкою більш комплексного набору показників НТІ. Ці тематичні показники будуть порівнювати на міжнародному рівні, щоб їх можна було використовувати для кращого націлювання політики на досягнення прогресу в національних, регіональних і глобальних напрямках.

В Україні формування фондів науково-технічної інформації здійснюється шляхом реєстрації НДДКР в Українському інституті науково-технічної експертизи та інформації (УкрІНТЕІ). Основним джерелом інформації є форми звітності, передбачені постановами Кабінету міністрів України [4,5]. Створені в УкрІНТЕІ бази даних слугують джерелом інформації для моніторингу використання результатів досліджень [6], аналізу стану інноваційної діяльності [7], визначення фактичних пріоритетів фінансування та ефективності НДР [8]. На рівні відомств також здійснюють моніторинг результатів досліджень у різних формах для забезпечення можливості проведення аналізу ефективності та контролю виконання НДР.

В Інституті досліджень науково-технічного потенціалу та історії науки ім. Г.М. Доброва НАН України провадиться моніторинг досліджень у галузі енергетики, створено бази даних НДР, завершених в установах Відділення фізико-технічних проблем енергетики НАН України (ВФТПЕ) за період з 1995 р. понині. Як індикатори моніторингу застосовуються доступні дані із протоколів завершених науково-дослідних робіт, які містять інформацію щодо напрямку робіт, строків виконання, кадрового складу виконавців, обсягів фінансування та досягнутих результатів (кількість статей, патентів та анований зміст роботи). Цінність накопиченого масиву даних полягає в достовірності інформації, зібраної за єдиною методикою протягом достатньо великого періоду часу (більше 25 років). Сформовано бази даних, які узагальнюють основні статистичні характеристики наукових досліджень за визначеними напрямками Енергетичної програми України, що дає змогу проводити аналіз тенденцій їхнього розвитку, оцінку рівня забезпеченості науковими кадрами та фінансовими ресурсами. Методика та результати моніторингу за попередні роки наведено в [9–11]. Накопичені масиви інформації допомагають аналізувати основні тенденції розвитку наукових досліджень у Відділенні ФТПЕ, зміни пріоритетів у часі, вплив обсягів фінансування на результативність досліджень і таке інше. Наприклад, проведений в [12] аналіз досліджень із відновлюваної енергетики засвідчив, що нинішній тренд розвитку цього напрямку в НАН України цілком узгоджується із цілями стратегії сталого розвитку та загальносвітовими тенденціями, згідно з якими використання відновлюваних джерел енергії є одним із пріоритетних напрямків енергетики. **Метою цієї статті** є публікація результатів моніторингу та статистичних даних із завершених протягом 1995–2021 рр. в установах ВФТПЕ робіт у галузі електроенергетики,



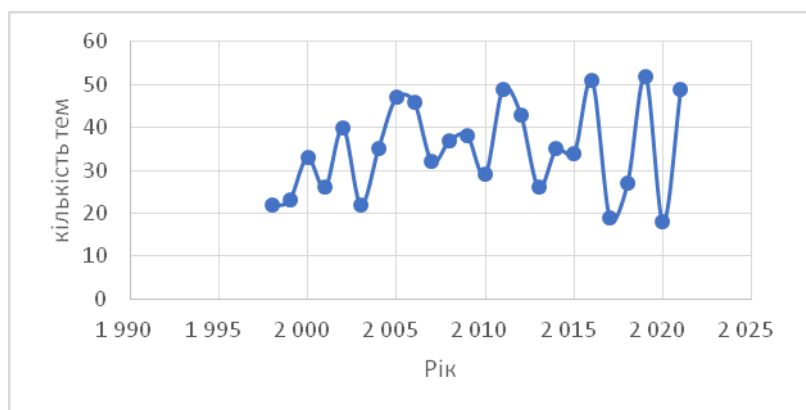
визначення основних трендів розвитку досліджень та оцінка стану фінансового забезпечення цих робіт.

**Методологія.** Структура створених баз даних відповідає структурі Енергетичної програми України, яка включає 10 основних напрямів:

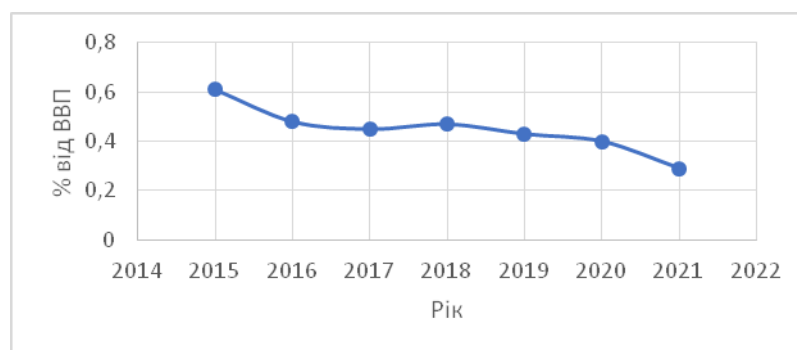
01. Вугільна промисловість.
02. Нафтогазовий комплекс.
03. Електроенергетика.
04. Атомна енергетика.
05. Нетрадиційна енергетика.
06. Енергозбереження.
07. Регіональні та загальні проблеми енергетики.
08. Науково-технічне забезпечення енергетики.
09. Екологія.
10. Проблеми Чорнобиля.

Відповідно до цієї класифікації кожна завершена тема має код, який містить індекс напрямку та рік завершення. Це дає змогу робити необхідні вибірки за напрямками досліджень й визначати обсяги фінансування, кадровий склад виконавців, результативність досліджень та їхній розподіл у часі. Така структурована інформація забезпечує можливість визначення трендів розвитку досліджень за окремими напрямками та їхнє порівняння в абсолютному та відносному вимірах.

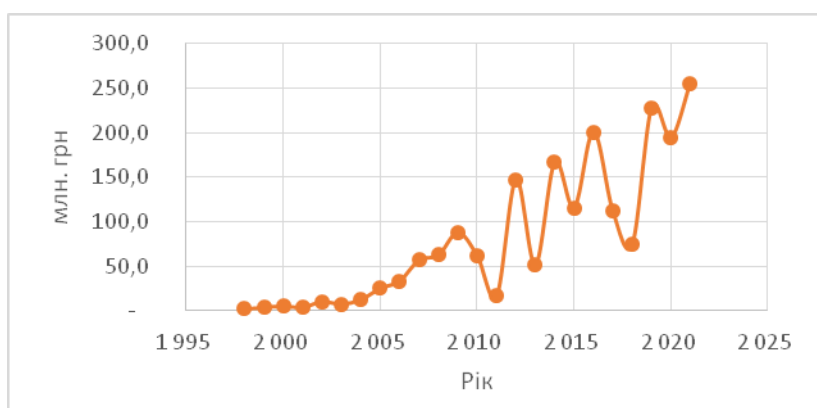
**Результати аналізу.** Було розглянуто кількісні та якісні показники завершених науково-дослідних робіт установ ВФТПЕ НАН України за період з 1995 по 2021 рр. Розподіл кількості завершених тем за роками наведено на рис. 1. Загальна кількість робіт за розглянутий період практично не змінилась і складає в середньому близько 33 тем на рік. Нерівномірність графіку пояснюється різною тривалістю виконання робіт (від 1 до 5 років), що призводить до періодичного ущільнення кількості завершених робіт в поточному році з частотою, близькою до середньої тривалості робіт (3 роки). Незважаючи на послідовне зменшення витрат на науку відносно ВВП (рис. 2), обсяги фінансування досліджень у галузі енергетики в абсолютному вимірі за цей час монотонно зростали й збільшились практично на два порядки (рис. 3). Слід зазначити, що певною мірою це пов'язано з інфляційними процесами в країні – в доларовому еквіваленті темп зростання не настільки високий, і за останні роки обсяги фінансування практично стабілізувались на постійному рівні, а лінія тренду вказує на скорочення, починаючи з 2012 року



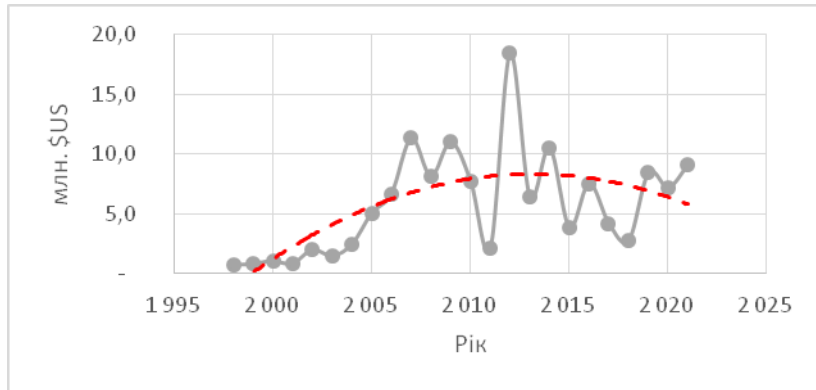
**Рис. 1.** Кількість завершених тем за період досліджень (Джерело: побудовано автором на основі власних розрахунків)



**Рис. 2.** Витрати на дослідження та розробки в Україні як частка ВВП. (Джерело: побудовано автором на основі даних [3])



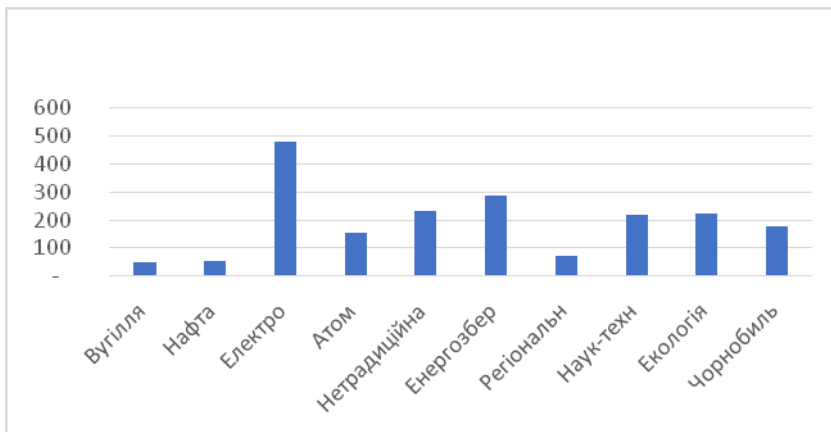
**Рис. 3.** Загальний обсяг фінансування установ ВФТПЕ, млн грн/рік (Джерело: побудовано автором на основі власних розрахунків)



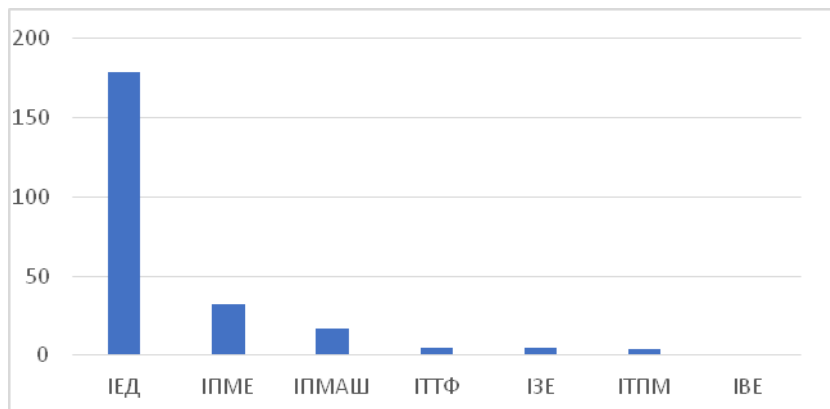
**Рис. 4.** Обсяг фінансування установ ВФТПЕ, млн \$/рік  
(Джерело: побудовано автором на основі власних розрахунків)

сування між напрямками досліджень ілюструє рис. 5, з якого випливає, що пріоритетним є напрям «електроенергетика», на долю якого припадає 25% загального фінансування (близько 500 млн грн). Це є відображенням важливості наукових досліджень для цієї наукоємної галузі народного господарства. Розподіл тематики за напрямом «електроенергетика» за установами ВФТПЕ наведено на рис. 6.

Найбільший обсяг робіт із проблем електроенергетики виконувався в Інституті електродинаміки (ІЕД), Інституті проблем моделювання в енергетиці (ІПМЕ) та Інституті проблем машинобудування (ІПМАШ). Також такі дослідження проводились в Інституті технічної теплофізики (ІТТФ), Інституті загальної енергетики (ІЗЕ), Інституті технічних проблем магнетизму (ІТПМ) та Інституті відновлюваної енергетики (ІВЕ).



**Рис. 5.** Фінансування за напрямками досліджень за 1995-2021р, млн грн  
(Джерело: побудовано автором на основі власних розрахунків)



**Рис. 6.** Розподіл фінансування тем з електроенергетики за установами ВФТПЕ  
(Джерело: побудовано автором на основі власних розрахунків)

(рис. 4). З іншого боку, це свідчить про важливість досліджень у галузі енергетики, які, незважаючи на загальне зменшення фінансування науки, не тільки зберегли початковий рівень, а й наростили обсяги фінансування.

Загальний обсяг фінансування установ ВФТПЕ НАН України за розглянутий період склав близько 2 млрд. грн. Розподіл фінансування між напрямками досліджень ілюструє рис. 5, з якого випливає, що пріоритетним є напрям «електроенергетика», на долю якого припадає 25% загального фінансування (близько 500 млн грн). Це є відображенням важливості наукових досліджень для цієї наукоємної галузі народного господарства. Розподіл тематики за напрямом «електроенергетика» за установами ВФТПЕ наведено на рис. 6.

Основні напрямки робіт пов'язані з розробкою моделі Об'єднаної енергосистеми України, аналізом наслідків об'єднання ринку електричної енергії України з ринками країн Європи. Останніми роками збільшено увагу до питань зниження вразливості енергосистеми шляхом розвитку систем розподіленої генерації енергії та до розробки планів відновлення після системних аварій, що особливо актуально в умовах військового часу. Також виконуються технологічні дослідження систем перетворення та передачі електроенергії, що забезпечують підвищення надійності, стійкості та ефективності електромереж. За результатами досліджень опубліковано 6345 статей, одержано 279 патентів.

**Висновки.** Завдяки постійному моніторингу результатів наукових досліджень установ ВФТПЕ, починаючи з 1995 р., створено базу даних закінчених науково-дослідних робіт, яка містить інформацію, класифіковану за напрямками Енергетичної програми України щодо тематики і кількості робіт, строків виконання, обсягів фінансування, кадрового потенціалу та результатів досліджень. Така база даних надає інструментарій, який дає змогу аналізувати стан досліджень за окремими напрямками, визначати політику фінансування та тенденції розвитку досліджень, їхню відповідність світовим тенденціям та завданням програм сталого розвитку. У статті наведено результати аналізу розвитку наукових досліджень з електроенергетики в установах Відділення Фізико-технічних проблем енергетики НАН України за період з 1995 по 2021 рр. Наведено статистичні дані з кількості завершених робіт, обсягів фінансування та їхньої результативності, визначено основні тренди розвитку досліджень. За розглянутий період відбулися певні структурні зміни в напрямках досліджень, що ініційовані світовими тенденціями переходу до системи сталого розвитку – центр уваги змістився від традиційної енергетики до питань стабільності й надійності енергосистем, використання відновлюваних джерел енергії, енергозбереження та проблем екології. Актуальність таких досліджень значно зростає в сучасних умовах військового стану. Особливим підтвердженням важливості та актуальності таких досліджень є факт послідовного зростання обсягів фінансування цієї тематики на фоні загального зменшення частки ВВП країни.

1. Основні характеристики імпаکت-інвестування. URL: <https://iris.thegiin.org/core-characteristics-of-impact-investing/>. (дата звернення 25.01.2024).
2. Цілі сталого розвитку. United Nations Development Programme. URL: <https://www.undp.org/uk/ukraine/tsili-staloho-rozvytku>. (дата звернення 25.01.2024).
3. The UNESCO Institute for Statistics (UIS). URL: <http://data.uis.unesco.org/index.aspx?queryid=74#> (дата звернення 25.01.2024).
4. Постанова Кабінету Міністрів України від 25.08.2004 р. № 1084 “Про затвердження Порядку формування і виконання замовлення на проведення фундаментальних наукових досліджень, прикладних наукових досліджень та виконання науково-технічних (експериментальних) розробок за рахунок коштів державного бюджету”. URL: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/1084-2004-%D0%BFv>. (дата звернення 25.02.2024).
5. Постанова КМ України від 11.01.2018 №13 "Про затвердження Порядку формування тематики наукових досліджень і науково-технічних (експериментальних) розробок, що фінансуються за рахунок коштів державного бюджету, та визнання такими, що втратили чинність, деяких постанов Кабінету Міністрів України". URL: <https://tax.gov.ua/diyalnist-/zakonodavstvo-pro-diyalnis/postanovi-km-ukraini/73897.html> (дата звернення 25.02.2024).
6. Булкін І.О. Визначення фактичних пріоритетів фінансування науково-технічної діяльності в Міністерстві освіти і науки України. *Наука та наукознавство*. 2022. № 4 (118). С. 32–65. DOI: <https://doi.org/10.15407/sofs2022.04.032>.
7. Криворучко Т.В. Моніторинг результативності інноваційної діяльності: стан та проблеми. Електронне наукове фахове видання “Державне управління: удосконалення та розвиток”. 2014. № 11. URL: <http://www.m.nayka.com.ua/?op=1&j=derzhavneupravlinnya-udokonallengnya-ta-rozvytok&s=ua&z=785>. (дата звернення 25.02.2024).
8. Гаврис Т.В. Підсумки моніторингу з упровадження результатів наукових досліджень і розробок. *Наука, технології, інновації*. 2018. № 1. С. 13–21.
9. Лобунець Л.Г. До питання систематизації результатів досліджень, отриманих в установах НАН України. *Наука та наукознавство. Матеріали VII щорічної конференції з наукознавства та історії науки* (Добровські читання). 2007. № 4. С. 180–182.
10. Лобунець Л.Г. Статистичні дані з публікацій щодо відображення діяльності наукових установ НАН України в енергетичній галузі за 2000–2008 роки. *Проблеми науки*. 2011. № 1. С. 42–44.
11. Лобунець Л.Г. Результати моніторингу досліджень установ Відділення фізико-технічних проблем енергетики НАН України за 2010–2015 рр. *Наука та наукознавство*. 2017. № 1(95). С. 60–69.
12. Лобунець Л.Г. Розвиток досліджень з відновлюваної енергетики в установах Відділення Фізико-технічних проблем енергетики НАН України. *Відновлювана енергетика*. 2022. № 4. С. 6–8. DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.4\(71\).6-8](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.4(71).6-8)

**ANALYSIS OF STATISTICAL DATA ON THE RESULTS OF COMPLETED WORKS IN THE FIELD OF ELECTRIC POWER IN THE INSTITUTIONS OF THE DEPARTMENT OF PHYSICAL AND TECHNICAL PROBLEMS OF ENERGY OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF UKRAINE**

**O.V. Kyrylenko<sup>1</sup>, L.G. Lobunets<sup>2</sup>**

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

2 – Dobrov Research Institute on Scientific and Technological Potential and Science History of the National Academy of Sciences of Ukraine, Taras Shevchenko Boulevard, 60, Kyiv, 01032, Ukraine

Considered the actual problem of monitoring the results of scientific research and collecting data necessary for the formation of policy for the development of priority areas of science, technology and innovation. An analysis of the development of research in the direction of "electric power" in the institutions of the Department of Physical and Technical Problems of Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine for the period from 1995 to 2021 was carried out. Indicators of the financing of these studies during the considered period are given, it is concluded that the growing trend of their financing against the background of the decreasing trend of general expenditures on science indicates the priority of this direction for the national economy of the country. Ref. 12, fig. 6.

**Keywords:** monitoring of scientific research, electric power industry, Department of Physical and Technical Problems of Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine.

1. The main characteristics of impact-investing. URL: <https://iris.thegiin.org/core-characteristics-of-impact-investing/>. (access date 25.01.2024). (Ukr)
2. Goals of sustainable development. United Nations Development Programme. URL: <https://www.undp.org/uk/ukraine/tsili-staloho-rozvytku>. (access date 25.01.2024). (Ukr)
3. The UNESCO Institute for Statistics (UIS). URL: <http://data.uis.unesco.org/index.aspx?queryid=74#> (access date 25.01.2024).
4. Decree of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated August 25, 2004 No. 1084 On approval of the Procedure for the formation and execution of an order for the conduct of fundamental scientific research, applied scientific research and the implementation of scientific and technical (experimental) development at the expense of the state budget. URL: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/1084-2004-%D0%BFv> (access date 25.02.2024). (Ukr)
5. Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated 11.01.2018 No. 13 On approval of the Procedure for the formation of topics of scientific research and scientific and technical (experimental) developments financed from the funds of the state budget, and recognition of certain resolutions as having lost their validity Cabinet of Ministers of Ukraine. URL: <https://tax.gov.ua/diyalnist-/zakonodavstvo-pro-diyalnis/postanovi-km-ukraini/73897.html> (access date 25.02.2024). (Ukr)
6. Bulkin I.O. Determining the actual funding priorities of scientific and technical activities in the Ministry of Education and Science of Ukraine. *Nauka ta naukoznavstvo*. 2022. No. 4 (118). Pp. 32–65. DOI: <https://doi.org/10.15407/sofs2022.04.032> (Ukr)
7. Kryvoruchko T.V. Monitoring of the effectiveness of innovative activity: status and problems. Electronic scientific publication. Public administration: improvement and development. 2014. No. 11. URL: <http://www.m.nayka.com.ua/?op=1&j=derzhavneupravlinnya-udoskonalennya-ta-rozvytok&s=ua&z=785> (access date 25.02.2024). (Ukr)
8. Havrys T.V. Results of monitoring on the implementation of the results of scientific research and development. *Nauka, tekhnologii, innovatsii*. 2018. No. 1. Pp. 13–21. (Ukr)
9. Lobunets L.H. To the issue of systematization of research results obtained in the institutions of the National Academy of Sciences of Ukraine. Science and science. *Materials of the 7th Annual Conference on Science and History of Science (Dobrovsky Readings)*. 2007. No. 4. Pp. 180–182. (Ukr)
10. Lobunets L.G. Statistical data from publications reflecting the activity of scientific institutions of the National Academy of Sciences of Ukraine in the energy sector for 2000–2008. *Problemy nauky*. 2011. No. 1. Pp. 42–44. (Ukr)
11. Lobunets L.G. Results of research monitoring of institutions of the Department of Physical and Technical Problems of Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine for 2010–2015. *Nauka ta naukoznavstvo*. 2017. No. 1(95). Pp. 60–69. (Ukr)
12. Lobunets L.G. Development of research on renewable energy in the institutions of the Department of Physical and Technical Problems of Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine. *Vidnovliuvana enerhetyka*. 2022. No. 4. Pp. 6–8. DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.4\(71\).6-8](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.4(71).6-8) (Ukr)

Надійшла: 25.06.2024

Прийнята: 16.07.2024

Submitted: 25.06.2024

Accepted: 16.07.2024



УДК 621.311

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2024.68.063>**АНАЛІЗ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ПОСЛУГ ПОСТАЧАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ****В.В. Черкашина\***, докт. техн. наук, **О.В. Яковенко\*\***

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,  
вул. Кирпичова, 2, Харків, 61002, Україна  
e-mail: [financier.ovya@gmail.com](mailto:financier.ovya@gmail.com)

*Об'єктом дослідження статті є процеси в розподільчих електричних мережах та їхній вплив на технічні й економічні характеристики основних показників надійності, яка характеризується безперервністю електропостачання, а саме показники якості послуг: індекс середньої тривалості довгих переривань та індекс середньої частоти довгих переривань (SAIDI, SAIFI), а також дотримання гарантованих стандартів якості надання послуг із постачання електричної енергії, які закріплені постановою НКРЕКП. Вирішується проблематика сукупності чинників, що направлені на зниження індексів середньої тривалості довгих переривань та середньої частоти довгих переривань (SAIDI, SAIFI) з урахуванням і застосуванням дієвих заходів стимулюючого тарифоутворення (Rab-тариф), направлених на забезпечення якісними послугами споживачів електричної енергії відповідно до гарантованих стандартів, які закріплені постановою НКРЕКП. Аналіз основних показників якості послуг SAIDI та SAIFI за період із 01.01.2022 до 31.03.2022 проведено на прикладі оператора системи розподілу АТ «Харківобленерго». Проаналізовано вплив факторів природного та неприродного характеру на формування цих показників із урахуванням форс-мажорних обставин та військової агресії на території Харківської області. Проаналізовано зміни показників якості послуг SAIDI та SAIFI та їхню відповідність установленим НКРЕКП нормативним значенням. Проведений аналіз показників якості послуг SAIDI та SAIFI дає змогу стверджувати, що досягнення цільових значень показників безперервності електропостачання є основоположним чинником для покращення якості послуг із постачання електричної енергії споживачам. Обґрунтовано з урахуванням стимулюючого тарифоутворення (Rab-тариф) забезпечення необхідних гарантованих стандартів якості надання послуг із постачання електричної енергії споживачам. Показано, що впровадження та розвиток стимулюючого тарифоутворення закладає надійний фундамент сильної та конкурентоспроможної України на теренах Європейського Союзу та запроваджує динамічний розвиток для сильної та незалежної української економіки. Бібл. 19, рисунок, таблиця.*

**Ключові слова:** електрична енергія, стимулююче тарифоутворення, оператор системи розподілу, показники якості послуг, розподільча електрична мережа, SAIDI, SAIFI, Rab-тариф.

**Вступ.** Якість електричної енергії – це сукупність властивостей електричної енергії відповідно до встановлених стандартів, які визначають ступінь її придатності для використання за призначенням. Якість електричної енергії характеризується фізичними параметрами поставленої споживачу електричної енергії та їхньою відповідністю встановленим показникам якості послуг із постачання електричної енергії [1].

Нормами чинного законодавства визначено основні показники надійності роботи електричних мереж, що мають відповідати параметрам, визначеним у ДСТУ EN 50160:2023 Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності (EN 50160:2022, IDT) [2].

Законом України «Про ринок електричної енергії», Правилами роздрібного ринку електричної енергії, Кодексом систем розподілу [3–5] регулюється співпраця, яка виникає на роздрібному ринку електричної енергії у процесі розподілу, постачання та споживання електричної енергії між операторами системи розподілу (ОСР) та споживачами.

Укладений договір між споживачем та ОСР є підставою для розподілу та постачання електричної енергії. Умови договору зобов'язують ОСР дотримуватися гарантованих стандартів і встановлених показників якості послуг з розподілу електричної енергії, зокрема мінімізувати переривання в постачанні електричної енергії.

Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг, проводить моніторинг показників якості електропостачання відповідно до Закону України «Про Національну комісію, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг» [6], статті 6 Закону України «Про ринок електричної



енергії» (для показників якості електропостачання) [3], а також постанови НКРЕКП від 14.09.2017 № 1120 «Про затвердження Порядку здійснення Національною комісією, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг, моніторингу ринків у сферах енергетики та комунальних послуг» [7].

Моніторинг якості електричної енергії здійснюється за двома напрямками: перевірка параметрів якості електричної енергії за скаргами споживачів у точках розподілу електричної енергії; контроль показників якості електричної енергії в системі передачі та розподілу.

Основні показники якості послуг із постачання електричної енергії споживачам – це безперервність електропостачання, комерційна якість надання послуг та якість електричної енергії. Проблематика надання якісних послуг із постачання електричної енергії споживачам є актуальним питанням для енергетичної галузі. Дослідженням цього питання займаються як українські, так і зарубіжні вчені [8–13]. Аналізуючи праці вчених [8–11], слід звернути увагу на те, що під час порівняльного аналізу статистичних даних щодо тривалих переривань у постачанні електричної енергії споживачам необхідно враховувати принципи узагальнення та уточнення статистики подій.

Так, узагальнений звіт щодо якості напруги, виданий Радою Європейських органів регулювання в енергетиці (CEER), містить огляд відповідних стандартів, які регламентують тривалі переривання в постачанні електричної енергії та їхні статистичні дані [12].

Із аналізу [12] випливає, що в нормальних робочих умовах річна тривалість переривань напруги, яка перевищує три хвилини, суттєво відрізняється між регіонами, що обумовлено відмінностями у побудові систем передачі та розподілу електричної енергії, а також впливом метеопараметрів та кліматичних умов, у яких функціонує система.

Також у деяких європейських країнах існує національна статистика щодо переривань напруги, яка містить статистично оброблені узагальнені значення показників якості постачання електричної енергії споживачам [11, 13].

Таким чином, для забезпечення встановлених гарантованих стандартів якості з постачання електричної енергії споживачам доцільне уточнення статистики подій, які спонукають до переривань в електропостачанні.

**Мета статті.** Проаналізувати показники якості послуг із постачання електричної енергії: індекси середньої тривалості довгих переривань та середньої частоти довгих переривань (SAIDI, SAIFI) на прикладі оператора системи розподілу АТ «Харківобленерго» та обґрунтувати з урахуванням стимулюючого тарифоутворення (Rab-тариф) забезпечення необхідних гарантованих стандартів якості надання послуг із постачання електричної енергії споживачам.

#### **Матеріали та методи досліджень.**

#### **Аналіз чинних показників якості послуг із постачання електричної енергії.**

Однією з найважливіших характеристик роботи ОСП є надійність постачання електричної енергії споживачам, яка відповідно до [5] відображається у таких основних показниках:

1) індекс середньої тривалості довгих переривань в електропостачанні (SAIDI), розраховується як відношення сумарної тривалості довгих переривань в електропостачанні в точках комерційного обліку електричної енергії, де припинено електропостачання протягом звітного періоду, до загальної кількості точок комерційного обліку електричної енергії, за формулою:

$$SAIDI = \frac{\sum_{i=1}^k t_i \cdot n_i}{n} \cdot xB \quad (1)$$

де  $t_i$  – тривалість  $i$ -ї довгої перерви в електропостачанні, хв;  $n_i$  – кількість точок комерційного обліку електричної енергії, в яких було припинене електропостачання в результаті  $i$ -ї довгої перерви в електропостачанні, шт.;  $k$  – кількість довгих переривань в електропостачанні протягом звітного періоду;  $i$  – номер довгої перерви в електропостачанні,  $i = 1, 2, 3, \dots, k$ ;  $n$  – загальна кількість точок комерційного обліку електричної енергії, шт.,

2) індекс середньої частоти довгих переривань в електропостачанні (SAIFI), розраховується як відношення сумарної кількості відключених точок комерційного обліку електричної енергії, де припинено електропостачання внаслідок усіх довгих переривань в



електропостачанні протягом звітного періоду, до загальної кількості точок комерційного обліку електричної енергії, за формулою:

$$SAIFI = \frac{\sum_{i=1}^k n_i}{n}, \text{ відн. од.} \quad (2)$$

де  $n_i$  – кількість точок комерційного обліку електричної енергії, в яких було припинене електропостачання в результаті  $i$ -ї довгої перерви в електропостачанні, шт.;  $k$  – кількість довгих переривань в електропостачанні протягом звітного періоду;  $i$  – номер довгої перерви в електропостачанні,  $i = 1, 2, 3, \dots, k$ ;  $n$  – загальна кількість точок комерційного обліку електричної енергії, шт.

Вищезазначені основні показники надійності роботи системи розподілу (формули (1), (2)) дають змогу характеризувати складову якості постачання електричної енергії в розподільчих електричних мережах [5]. Також показники якості SAIDI та SAIFI необхідні ОСП для розвитку електричних мереж з метою більш глибокої інтеграції до Європейського Союзу та надання якісних послуг зі збереженням необхідних гарантованих стандартів якості щодо постачання електричної енергії споживачам.

**Аналіз показників якості SAIDI та SAIFI для ОСП АТ «Харківобленерго».** Згідно з [2] переривання в постачанні електричної енергії класифікують як заплановані (з попередженням споживачів) та аварійні (без попередження споживачів: вихід з ладу енергетичного обладнання, стороннє втручання в його роботу, форс-мажорні обставини та ін.).

Випадкові переривання в електропостачанні бувають довгими (більше ніж три хвилини) та короткочасними (до трьох хвилин включно).

На прикладі ОСП АТ «Харківобленерго» проаналізовано зазначені вище переривання в постачанні електричної енергії в період з 01.01.2022 до 31.03.2022 та побудовано таблицю.

Використовуючи показники переривань в електропостачанні (див. таблицю), інформацію в звіті НКРЕКП «Показники якості надання послуг у сферах електропостачання і централізованого водопостачання та водовідведення у 1-му півріччі 2022 року» [14] та (ф. 1, 2), визначаються індекси середньої тривалості довгих переривань в електропостачанні (SAIDI) та середньої частоти довгих переривань в електропостачанні (SAIFI) для ОСП АТ «Харківобленерго».

За **січень 2022 року** SAIDI складає 115,4 хв. за всіма класами напруги. Найбільш тривалими перервами були відключення споживачів через:

- переривання без попередження – це тимчасове припинення електропостачання споживачам, яке пов'язане з експлуатаційним обслуговуванням, будівництвом, реконструкцією, модернізацією електричних мереж (позапланові та аварійні ремонти електричних мереж), про яке споживачів не було повідомлено не пізніше ніж за 5 днів, що передували зазначеній перерві, та склали 46,5 хв.;

- переривання з причин технологічного порушення в електричних мережах ОСП, спричинені відмовою в роботі електротехнічного обладнання ОСП, та всі переривання, причини виникнення яких залишилися не виявленими, та склали 43,3 хв.

Ці відключення були так само зумовлені застарілістю енергетичного обладнання ОСП, зимовими погодними умовами та складністю проведення ремонтних робіт у зимовий період.

За **січень 2022 року** SAIFI складає 0,58 відн. од. за всіма класами напруги.

За **лютий 2022 року** SAIDI складає 409,6 хв. за всіма класами напруги. Найдовші переривання в електропостачанні було зафіксовано через: переривання з вини інших осіб та форс-мажорні обставини, а не з вини ОСП або споживача, які склали 316,1 хв.; переривання без попередження споживачів – 42,7 хв.; переривання з причин технологічного порушення у електричних мережах ОСП – 35,3 хв.

Ці відключення були зафіксовані не тільки через вплив форс-мажорних обставин, що виникли внаслідок надзвичайних та непереборних сил, дію яких неможливо попередити застосуванням високопрофесійної практики персоналу, та які можуть бути спричинені винятковими погодними умовами, стихійним лихом та іншими непередбачуваними ситуаціями, а й з початком 24.02.2022 повномасштабних бойових дій на території України, зокрема і в Харківській області.

Рівень напруги, кВ	Індекс середньої тривалості довгих переривань в електропостачанні (SAIDI), хв.							Індекс середньої частоти довгих переривань в електропостачанні (SAIFI), відн. од.								
	Заплановані переривання		Незаплановані (аварійні) переривання					усього	Заплановані переривання		Незаплановані (аварійні) переривання					усього
	з попередженням	без попередження	з вини інших ліцензіатів	форс-мажорні обставини	з вини інших осіб	технологічні порушення в мережах ОСР	з попередженням		без попередження	з вини інших ліцензіатів або споживачів	форс-мажорні обставини	з вини інших осіб	технологічні порушення в мережах ОСР			
<b>Січень 2022 року / Підключено за всіма класами напруги 1 250 607 споживачів</b>																
110 - 154	-	-	-	-	-	0,3	0,3	-	-	-	-	-	0,00	0,00		
27,5 - 35	0,1	0,7	-	-	-	2,0	2,8	0,00	0,01	-	-	-	0,01	0,02		
6 - 20	12,9	24,1	0,3	7,9	0,1	15,5	60,7	0,06	0,19	0,00	0,02	0,00	0,07	0,34		
0,4	4,1	21,7	0,0	0,1	0,1	25,5	51,5	0,02	0,12	0,00	0,00	0,00	0,07	0,21		
Усього	17,0	46,5	0,3	8,0	0,2	43,3	115,4	0,08	0,32	0,00	0,02	0,00	0,16	0,58		
<b>Лютий 2022 року / Підключено за всіма класами напруги 1 250 607 споживачів</b>																
110 - 154	-	-	-	-	106,8	-	106,8	-	-	-	-	0,02	-	0,02		
27,5 - 35	-	-	-	-	162,0	0,9	162,9	-	-	-	-	0,01	0,01	0,02		
6 - 20	14,1	23,6	0,0	-	47,2	20,3	105,3	0,06	0,17	0,00	-	0,01	0,08	0,33		
0,4	1,4	19,0	-	-	0,0	14,1	34,5	0,01	0,11	-	-	0,00	0,03	0,15		
Усього	15,5	42,7	0,0	0,0	316,1	35,3	409,6	0,07	0,28	0,00	0,00	0,05	0,12	0,52		
<b>Березень 2022 року / Підключено за всіма класами напруги 1 250 607 споживачів</b>																
110 - 154	-	-	-	-	2 155,6	0,4	2 156,0	-	-	-	-	0,11	0,01	0,13		
27,5 - 35	-	-	-	-	11,6	5,5	17,0	-	-	-	-	0,00	0,01	0,01		
6 - 20	-	5,4	-	-	484,0	88,3	577,7	-	0,06	-	-	0,03	0,17	0,26		
0,4	0,0	0,5	-	0,1	3,5	22,9	27,0	0,00	0,00	-	0,00	0,00	0,04	0,04		
Усього	0,0	5,9	0,0	0,1	2 654,6	117,0	2 777,7	0,00	0,06	0,00	0,00	0,15	0,23	0,44		

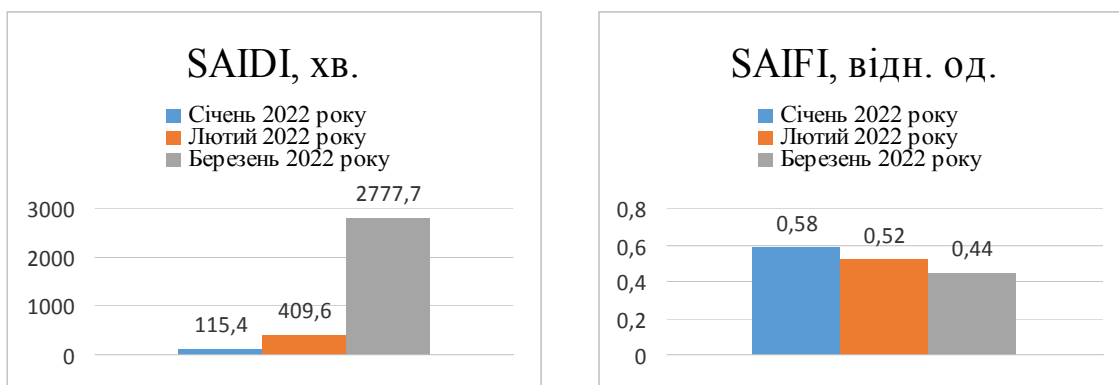
За лютий 2022 року SAIFI складає 0,52 відн. од. за всіма класами напруги.

За березень 2022 року SAIDI складає 2777,7 хв. за всіма класами напруги. Найтривалішими перериваннями в електропостачанні за цей період зафіксовано перерви з вини інших осіб, які спричинили бойові дії на території ОСР Харківської області. Ці перерви становлять 2654,6 хв. Також тривалими були перерви з причин технологічного порушення в електричних мережах ОСР – 117,0 хв.

За березень 2022 року SAIFI складає 0,44 відн. од. за всіма класами напруги.

Фактичні показники SAIDI та SAIFI за період з січня до березня 2022 року показано графіками на рисунку. Аналізуючи SAIDI та SAIFI для ОСР АТ «Харківобленерго» (див. рисунок), можна зробити висновок, що збільшення тривалості довгих переривань (SAIDI) та зменшення їхньої частоти (SAIFI) впродовж березня 2022 року спровоковано активними бойовими діями на території Харківської області, чотирнадцять районів якої в цей період знаходилися під постійними обстрілами, а п'ять районів були окуповані.

Також під час аналізу показників якості надання послуг із постачання електричної енергії помічено, що внаслідок близькості до ворожих військ, постійних обстрілів та смертельної загрози для життя працівників АТ «Харківобленерго» деякі ділянки розподільчої електричної мережі були відключені впродовж довгого часу, що відобразилося на значеннях показників SAIDI та SAIFI.



Графіки фактичних показників SAIDI та SAIFI за період з січня до березня 2022 року

**Результати та обговорення.** Реформуванням енергетичної галузі України передбачено створення сприятливих умов для залучення інвестицій у розвиток ринку енергетики. Методика формування тарифів на послуги з розподілу електричної енергії має забезпечувати справедливі норми прибутку на інвестований капітал, а також короткострокові та довгострокові стимули ОСР до підвищення ефективності його роботи.

Протягом 2020 року відбулося реформування системи цінового регулювання, а саме удосконалено нормативну базу НКРЕКП, яку прийнято ще в 2013 році, що дало змогу запровадити стимулююче тарифоутворення (Rab-тариф) для ОСР [15].

Згідно з вимогами Закону України «Про ринок електричної енергії» [3] прийнято постанову НКРЕКП від 05.10.2018 № 1175 «Про затвердження Порядку встановлення (формування) тарифів на послуги з розподілу електричної енергії» (Порядок) [16], якою визначено процедуру встановлення тарифів на послуги з розподілу електричної енергії за умови переходу на стимулююче тарифоутворення, та постанову НКРЕКП від 23.07.2013 № 1009 «Про встановлення параметрів регулювання, що мають довгостроковий строк дії, для цілей стимулюючого регулювання» [17], якою встановлено регуляторний період параметрів регулювання. Постанова [17] має довгострокову дію з метою стимулюючого регулювання для суб'єктів господарювання, які мають ліцензію на провадження господарської діяльності з розподілу електричної енергії.

У 2021 році для АТ «Харківобленерго» запроваджено стимулююче регулювання. Метою є залучення інвестицій на розвиток енергетичного сектору України, який включає будівництво та модернізацію інфраструктури електричних мереж, стимулювання ефективності витрат ОСР шляхом довгострокового регулювання тарифів. Новим Порядком встановлення тарифів на розподіл електричної енергії [16] передбачено коригування необхідного доходу товариства за даними виконання завдання щодо досягнення цільових значень показників надійності. Так, для ОСР встановлені щорічні завдання зі зниження показників SAIDI з метою досягнення цільових значень, які становлять 150 хвилин для міської та 300 хвилин для сільської території протягом чотирнадцяти років з початку переходу на стимулююче регулювання [17].

Ураховуючи нормативну базу України й спираючись на результати досліджень та значення показників, які наведено у таблиці і на рисунку, слід зазначити, що в АТ «Харківобленерго» у березні 2022 року склалася критична ситуація, коли в результаті форс-мажорних обставин, які спричинені не тільки погодними умовами, а й бойовими діями на території України, показники SAIDI та SAIFI значно перевищили допустимо встановлені національним Регулятором значення [18].

Але, незважаючи на складні та надзвичайно ризиковані умови праці в АТ «Харківобленерго», за результатами проаналізованого періоду в лютому порівняно з січнем спостерігається тенденція до зниження показників SAIDI та SAIFI для запланованих переривань з попередженням споживачів, що можна пояснити запровадженням у 2021 році

для АТ «Харківобленерго» стимулюючого тарифоутворення (Rab-тариф).

Rab-тариф, направлений на розбудову та розвиток енергетичного сектору України, дає змогу збільшити інвестиційну програму ОСР на будівництво та модернізацію електричних мереж та досягти рекордного за останнє десятиріччя показника її виконання [19].

Впровадження Rab-тарифу надало АТ «Харківобленерго» дієвих стимулів до скорочення неефективних операційних витрат та покращення показників діяльності відповідно до взятих ОСР зобов'язань [15–17].

Спираючись на [14], можна зробити висновок, що з урахуванням запровадженого Rab-тарифу покращилися як економічні, так і технічні показники діяльності АТ «Харківобленерго», а саме відбулося:

- збільшення обсягу інвестиційних програм у розбудову, модернізацію та реконструкцію електричних мереж із відповідними позитивними наслідками для технічного стану розподільчих електричних мереж, безпеки та якості послуг із розподілу електричної енергії;
- зниження величини технологічних втрат електричної енергії в електричних мережах;
- покращення показників ефективності господарської діяльності ОСР;
- поліпшення показників надійності, а саме безперервності постачання електричної енергії, тобто скорочення кількості та тривалості переривань в електропостачанні.

Таким чином, урахування Rab-тарифу під час аналізу показників якості надання послуг дасть змогу комплексно оцінити технічні та економічні показники господарської діяльності ОСР, забезпечуючи комерційну якість надання послуг, безперервність електропостачання та якість електричної енергії.

**Висновок.** Проаналізовано показники якості надання послуг із постачання електричної енергії: індекси середньої тривалості довгих переривань та середньої частоти довгих переривань (SAIDI, SAIFI) на прикладі оператора системи розподілу АТ «Харківобленерго» за період з 01.01.2022 по 31.03.2022. Показано вплив факторів природного та неприродного характеру на формування показників надійності з урахуванням форс-мажорних обставин та військової агресії на території Харківської області.

Проведений аналіз показників якості постачання електричної енергії SAIDI та SAIFI дає змогу стверджувати, що досягнення цільових значень показників безперервності електропостачання є одним із ключових факторів, який допомагає формувати сприятливий інвестиційний клімат, та основоположним чинником для покращення якості надання послуг із постачання електричної енергії споживачам.

Обґрунтовано з урахуванням стимулюючого тарифоутворення (Rab-тариф) забезпечення необхідних гарантованих стандартів якості надання послуг із постачання електричної енергії споживачам. Показано, що впровадження та розвиток стимулюючого тарифоутворення закладає надійний фундамент сильної та конкурентоспроможної України на теренах Європейського Союзу. Rab-тариф позиціонується як позитивна зміна, де переваги надаються ОСР, споживачам та інвесторам енергетичного сектору, а також запроваджує динамічний розвиток для сильної та незалежної української економіки.

1. НКРЕКП. Якість постачання електричної енергії. URL: <https://www.nerc.gov.ua/sferi-diyalnosti/elektroenergiya/yakist-elektropostachannya/yakist-elektrichnoyi-energiyi>
2. ДСТУ EN 50160:2023 Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності (EN 50160:2022, IDT). Київ, ДП «УкрНДНЦ», 2023.
3. Про ринок електричної енергії: Закон України від 13.04.2017 № 2019-VIII. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2019-19#Text>
4. Про затвердження Правил роздрібного ринку електричної енергії: Постанова НКРЕКП від 14.03.2018 № 312. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0312874-18#Text>
5. Про затвердження Кодексу систем розподілу: Постанова НКРЕКП від 14.03.2018 № 310. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0310874-18#Text>
6. Про Національну комісію, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг. Закон України від 22.09.2016 № 1540-VIII. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1540-19#Text>
7. Про затвердження Порядку здійснення Національною комісією, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг, моніторингу ринків у сферах енергетики та комунальних послуг: Постанова НКРЕКП від 14.09.2017 № 1120. <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v1120874-17#Text>



8. Івакіна К.Я., Головченко Д.А. Аналіз стану та шляхи підвищення надійності роботи електричних мереж. *IV Всеукраїнська науково-практична інтернет-конференція здобувачів вищої освіти і молодих учених. Проблеми сучасної електроенергетики, електротехніки та електромеханіки у післявоєнному періоді*, 24 листопада 2023. Харківський національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова, м. Харків, Україна, С. 80–82.
9. Сердюк Б.М., Ліщук А.А. Використання показників SAIDI, SAIFI для економічної оцінки надійності електропостачання промислових підприємств. *Ефективна економіка*. 2012. № 2.
10. Трунова І.М., Ященко Є.А. Аналіз надійності електропостачання споживачів за цільовими показниками. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства*. Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України. 2019. № 204. С. 6–7.
11. Kyrylenko O.V., Strzelecki R., Denysiuk S.P., Derevianko D.G. Main features of the stability and reliability enhancement of electricity grid with DG in Ukraine based on IEEE standards. *Технічна електродинаміка*. 2013. № 6. С. 46–50.
12. 7-й порівняльний звіт CEER «7TH CEER-ECRB BENCHMARKING REPORT ON THE QUALITY OF ELECTRICITY AND GAS SUPPLY. 2022». URL: <https://www.ceer.eu/documents/104400/7324389/7th+Benchmarking+Report/15277cb7-3ffe-8498-99bb-6f083e3ceecb>
13. Yuan-Kang Wu, Quoc-Thang Phan, Cheng-Liang Huang «Study of Reliability and Resilience of Distribution Systems in Taiwan». DOI: <https://doi.org/10.1109/ECICE59523.2023.10383159>
14. Звіт НКРЕКП «Показники якості надання послуг у сферах електропостачання і централізованого водопостачання та водовідведення у 1-му півріччі 2022 року». URL: [https://www.nerc.gov.ua/storage/app/sites/1/Docs/Sfery\\_ElektroEnergiia/Monitoring\\_elektrto/Zvit\\_pokaznyky\\_v\\_akosti-poslug\\_1kv\\_2022.pdf](https://www.nerc.gov.ua/storage/app/sites/1/Docs/Sfery_ElektroEnergiia/Monitoring_elektrto/Zvit_pokaznyky_v_akosti-poslug_1kv_2022.pdf)
15. Про застосування стимулюючого регулювання при провадженні господарської діяльності з розподілу електричної енергії: Постанова НКРЕКП від 26.07.2013 № 1029. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1294-13#Text>
16. Про затвердження Порядку встановлення (формування) тарифів на послуги з розподілу електричної енергії: Постанова НКРЕКП від 05.10.2018 № 1175. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v1175874-18#Text>
17. Про встановлення параметрів регулювання, що мають довгостроковий строк дії, для цілей стимулюючого регулювання: Постанова НКРЕКП від 23.07.2013 № 1009. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1266-13#Text>
18. Національний Регулятор у сфері енергетики запроваджує стимулююче тарифоутворення для ОСП (Rab - регулювання). URL: <https://eba.com.ua/natsionalnyj-regulyator-u-sferi-energetyky-zaprovadzhuje-stymulyuyuche-taryfotvorennya-dlya-osr-rab-regulyuvannya/>
19. RAB на дроті: навіщо Україні стимулююче регулювання в енергетиці. URL: <https://www2.deloitte.com/ua/uk/pages/press-room/deloitte-press/2020/RAB-in-Ukraine.html>

## ANALYSIS OF SERVICE QUALITY INDICATORS SUPPLY OF ELECTRIC ENERGY

V.V. Cherkashyna, O.V. Yakovenko

National Technical University Kharkiv Polytechnic Institute,  
2 Kirpychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine  
e-mail: [financier.ovya@gmail.com](mailto:financier.ovya@gmail.com)

*The object of the study is the processes in distribution electric networks and their influence on technical and economic characteristics aimed at achieving the main indicators of reliability, which is characterized by the continuity of electricity supply, namely, indicators of the quality of services: the index of the average duration of long interruptions and the index of the average frequency of long interruptions ( SAIDI, SAIFI), as well as compliance with the guaranteed quality standards of electric energy supply services, which are established by the Resolution of the NCRECP.*

*The problem to be solved is a set of factors aimed at reducing the index of the average duration of long interruptions and the index of the average frequency of long interruptions (SAIDI, SAIFI), taking into account and applying effective measures of stimulating tariff formation (Rab - tariff) aimed at providing quality services to consumers of electric energy in accordance with the guaranteed standards established by the Resolution of the NCRECP.*

*The analysis of the main indicators of the quality of SAIDI and SAIFI services for the period from 01.01.2022 to 03.31.2022 was carried out on the example of the operator of the distribution system JSC "Kharkivoblenergo". The impact of natural and unnatural factors on the formation of these indicators is analyzed, taking into account force majeure circumstances and military aggression on the territory of the Kharkiv region. The changes in the quality indicators of SAIDI and SAIFI services and their compliance with the normative values established by the NCRECP were analyzed. The conducted analysis of SAIDI and SAIFI service quality indicators allows us to state that achieving the target values of electricity supply continuity indicators is a fundamental factor for improving the quality of electricity supply services to consumers. The provision of the necessary guaranteed quality standards for the supply of electric energy to consumers is substantiated taking into account the stimulating tariff formation (Rab - tariff). It is shown that the introduction and development of stimulating tariff formation lays a reliable foundation for a strong and*

competitive Ukraine on the territory of the European Union and introduces dynamic development for a strong and independent Ukrainian economy. Ref. 19, figure, table.

**Key words:** electric energy, incentive tariff formation, distribution system operator, service quality indicators, distribution electric network, SAIDI, SAIFI, Rab-tariff.

1. NCREKP. Quality of electricity supply. URL: <https://www.nerc.gov.ua/sferi-diyalnosti/elektroenergiya/yakist-elektropostachanya/yakist-elektrichnoyi-energiyi> (Ukr)
2. DSTU EN 50160:2023 Characteristics of power supply voltage in electrical networks of general purpose (EN 50160:2022, IDT). Kyiv, DP UkrNDNTs, 2023.
3. On the Electric Energy Market: Law of Ukraine 13.04.2017 No. 2019-VIII. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2019-19#Text> (Ukr)
4. On Approval of the Rules of the Retail Electricity Market: Resolution of the NCRECP 14.03.2018 No. 312. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0312874-18#Text> (Ukr)
5. On approval of the Distribution Systems Code: Resolution of the NCRECP 14.03.2018 No. 310. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0310874-18#Text> (Ukr)
6. On the National Commission, which carries out state regulation in the spheres of energy and communal services: Law of Ukraine 22.09.2016 No. 1540-VIII. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1540-19#Text> (Ukr)
7. On approval of the Procedure for implementation by the National Commission, which carries out state regulation in the spheres of energy and communal services, of market monitoring in the spheres of energy and communal services: Resolution of the NCRECP 14.09.2017 No. 1120. <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v1120874-17#Text> (Ukr)
8. Ivakina K.Ya., Golovchenko D.A. Analysis of the state and ways to improve the reliability of electrical networks. *IV All-Ukrainian scientific and practical internet conference of higher education graduates and young scientists Problems of modern power engineering, electrical engineering and electromechanics in the post-war period*. November 24, 2023. Kharkiv National University of Urban Economy named after Beketov, Kharkiv, Ukraine. Pp. 80–82. (Ukr)
9. Serdyuk B.M., Lishchuk A.A. Use of SAIDI, SAIFI indicators for economic assessment of reliability of power supply of industrial enterprises. *Effektyvna ekonomika*. 2012. No. 2. (Ukr)
10. Trunova I.M., Yashchenko E.A. Analysis of reliability of electricity supply to consumers according to target indicators. *Bulletin of Kharkiv National Technical University of Agriculture*. Problems energy supply and energy saving in the agricultural sector of Ukraine. 2019. No. 204. Pp. 6–7. (Ukr)
11. Kyrylenko O.V., Strzelecki R., Denysiuk S.P., Derevianko D.G. Main features of the stability and reliability enhancement of electricity grid with DG in Ukraine based on IEEE standards. *Tekhnichna Electrodynamika*. 2013. No. 6. Pp. 46–50.
12. 7th CEER comparative report 7TH CEER-ECRB BENCHMARKING REPORT ON THE QUALITY OF ELECTRICITY AND GAS SUPPLY. 2022. URL: <https://www.ceer.eu/documents/104400/7324389/7th+Benchmarking+Report/15277cb7-3ffe-8498-99bb-6f083e3ceecb>
13. Yuan-Kang Wu, Quoc-Thang Phan, Cheng-Liang Huang Study of Reliability and Resilience of Distribution Systems in Taiwan. DOI: <https://doi.org/10.1109/ECICE59523.2023.10383159>
14. Indicators of the quality of service provision in the fields of electricity supply and centralized water supply and drainage in the 1st half of 2022: Report of the NCRECP. URL: [https://www.nerc.gov.ua/storage/app/sites/1/Docs/Sfery\\_ElektroEnergiia/Monitoring\\_elektrto/Zvit\\_pokaznyky\\_yakosti-poslug\\_1kv\\_2022.pdf](https://www.nerc.gov.ua/storage/app/sites/1/Docs/Sfery_ElektroEnergiia/Monitoring_elektrto/Zvit_pokaznyky_yakosti-poslug_1kv_2022.pdf) (Ukr)
15. On the application of stimulating regulation in the conduct of economic activity on the distribution of electric energy: Resolution of the NCRECP 26.07.2013 No. 1029. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1294-13#Text> (Ukr)
16. On approval of the Procedure for establishing (forming) tariffs for electricity distribution services: Resolution of the NCRECP 05.10.2018 No. 1175. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v1175874-18#Text> (Ukr)
17. On establishment of long-term regulatory parameters for the purposes of stimulating regulation: Resolution of the NCRECP 23.07.2013 No. 1009. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1266-13#Text> (Ukr)
18. The National Regulator in the field of energy introduces stimulating tariff formation for the OSR (Rab - regulation). URL: <https://eba.com.ua/natsionalnyi-regulyator-u-sferi-energetyky-zaprovadzhuje-stymulyuyuchy-taryfotvorennya-dlya-osr-rab-regulyuvannya/> (Ukr)
19. RAB on the wire: why does Ukraine need stimulating energy regulation. URL: <https://www2.deloitte.com/ua/uk/pages/press-room/deloitte-press/2020/RAB-in-Ukraine.html> (Ukr)

Надійшла: 11.06.2024

Прийнята: 18.07.2024

Submitted: 11.06.2024

Accepted: 18.07.2024



УДК 621.311

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2024.68.071>

## ЗБІЛЬШЕННЯ ПРОПУСКНОЇ СПРОМОЖНОСТІ МАГІСТРАЛЬНИХ МЕРЕЖ УКРАЇНИ

**О.С. Богомолова\***, канд. техн. наук, **Д.В. Кравченко**

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»,  
пр. Берестейський, 37, Київ, 03056, Україна  
e-mail: [bohomoalovaos@ukr.net](mailto:bohomoalovaos@ukr.net)

*У зв'язку із прогнозованим суттєвим збільшення попиту на електроенергію до 2030 року, а також з метою розвитку електроенергетичної системи та ефективної взаємодії ОЕС України з енергетичними системами Європейського Союзу розглядається питання необхідності та доцільності переведення електричних мереж України з напруги 330 кВ на напругу 400 кВ, порівняння технічних характеристик мереж різних класів напруги з погляду надійності, стійкості та ефективності роботи таких мереж. У роботі виконано прикладний аналіз ефективності переведення мереж номінальної напруги 330 кВ на клас напруги 400 кВ за критерієм збільшення пропускної спроможності електрообладнання та зменшення сумарних втрат потужності в мережі. На прикладі Дніпровського регіону ОЕС України в комплексі комп'ютерних програм, призначених для проектування електромереж енергосистем «ТЕЗАУРУС», виконано моделювання та аналіз режимів роботи електричної мережі на напрузі 330 та 400 кВ. У результаті встановлено, що збільшення рівня напруги призведе до зниження завантаженості певних ділянок ліній на 17 %, водночас значення сумарних втрат мережі знизиться на 10,8 %. Бібл. 4, рис. 3.*

**Ключові слова:** напруга електричної мережі, лінія електропередачі, ОЕС України, магістральні мережі.

Електроенергетичний сектор України знаходиться на шляху революційного оновлення та модернізації в контексті зростаючих потреб та вимог сучасного суспільства. Щорічний ріст електроспоживання призводить до збільшення навантаження на елементи системи електропостачання. За прогнозами до 2030 року попит на електроенергію у країні складатиме 150 ТВт·год, що на 30 % більше, ніж сьогодні [1].

В ОЕС України однією з головних артерій енергетичної інфраструктури є магістральні електричні мережі 330 та 400 кВ, якими потужність з електростанцій надходить у мережі 110 кВ і нижче. Строк експлуатації обладнання магістральних електричних мереж є обмеженим факторами старіння ізоляції, зменшення міцності проводів унаслідок явищ природного або воєнного характеру. Старіння обладнання, зокрема повітряних ліній електропередачі (ЛЕП), автотрансформаторів, створює обтяження режиму експлуатації. Це проявляється в обмеженні максимальних струмів проводами ЛЕП або обмотками автотрансформаторів. Із метою забезпечення щораз більших об'ємів електричної енергії необхідне збільшення пропускної спроможності ЛЕП і автотрансформаторів.

Тенденція до використання пострадянських норм проектування електричних мереж є виправданою для класу номінальної напруги 750 кВ, оскільки в умовах наявності потужних атомних електростанцій (АЕС) сучасні мережі 750 кВ забезпечують повну видачу потужності енергоблоків ОЕС та спроможні витримати потужності понад 5000 МВт. Якщо припустити, що мережі 750 кВ відповідають прогнозу росту споживання на багато десятиліть вперед, то мережі 330 кВ мають певні недоліки. Обставини воєнного характеру продемонстрували стійкість об'єднаної енергосистеми України до перевантажень, але прикладний аналіз демонструє граничні режими ЛЕП за потужністю. Водночас щорічне зростання температури оточуючого середовища викликає зменшення пропускної спроможності лінії електропередачі, які зараз експлуатуються. Цей аспект пов'язаний безпосередньо з параметром термічної стійкості проводів ЛЕП, які мають певні межі щодо струму за різних температур.

У зв'язку з зазначеною недосконалістю та обмеженнями мереж 330 кВ авторами розглянуто варіант збільшення пропускної спроможності шляхом підвищення номінального класу напруги мережі зі 330 до 400 кВ. Зазначений перехід до номінальної напруги 400 кВ пов'язаний із поширеністю мереж класу номінальної напруги 400 кВ у країнах Європейсько-



го співтовариства і відповідно буде додатковим елементом енергетичної безпеки та розвитку стабільної енергомережі України, суттєво розширить можливість експорту електричної енергії та сформує ефективну взаємодію ОЕС України з енергетичними системами Європейського Союзу [2–3]. Досвід експлуатації мереж 400 кВ, а також доступність обладнання для заміни або ремонту створюють певний «еталон» для будь якої електричної мережі, оскільки важливою складовою надійної роботи енергосистеми є спроможність швидко відновлюватись, чи то перехідні процеси, чи серйозні ушкодження обладнання.

Реконструкція ЛЕП містить у собі такі етапи: переведення напруги, заміна проводів та ізоляторів із можливістю заміни ланцюгів проводів, модернізація трансформаторних підстанцій, розрахунок механічних характеристик ЛЕП, а також планування та розрахунок режимів роботи. Одним із успішних проєктів переведення на напругу 400 кВ в Україні є реконструкція ЛЕП «ХАЕС-Жешув» [4].

У цій роботі буде проведено прикладний аналіз ефективності переведу мереж номінальної напруги 330 кВ на клас напруги 400 кВ за критеріями збільшення пропускної спромо-

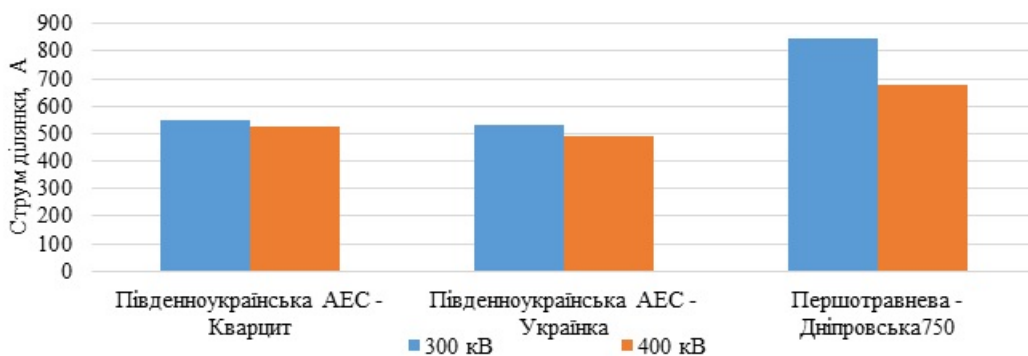


Рис. 1. Результат моделювання усталеного режиму роботи електричної мережі на напрузі 330 та 400 кВ (струм ділянки)

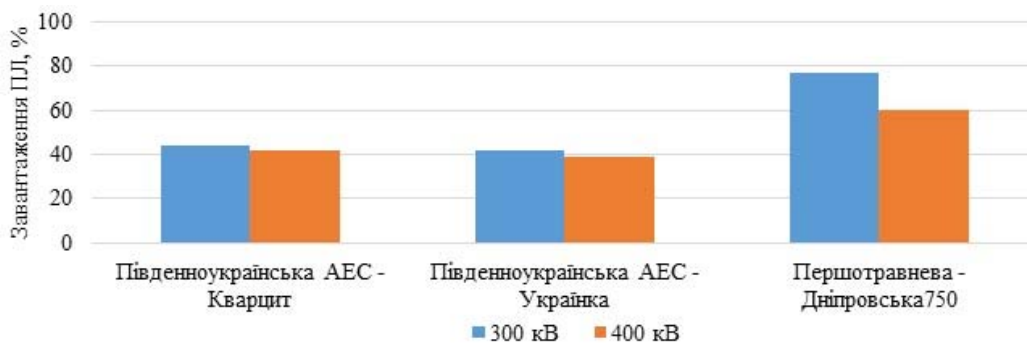


Рис. 2. Результат моделювання усталеного режиму роботи електричної мережі на напрузі 330 та 400 кВ (завантаження ПЛ)

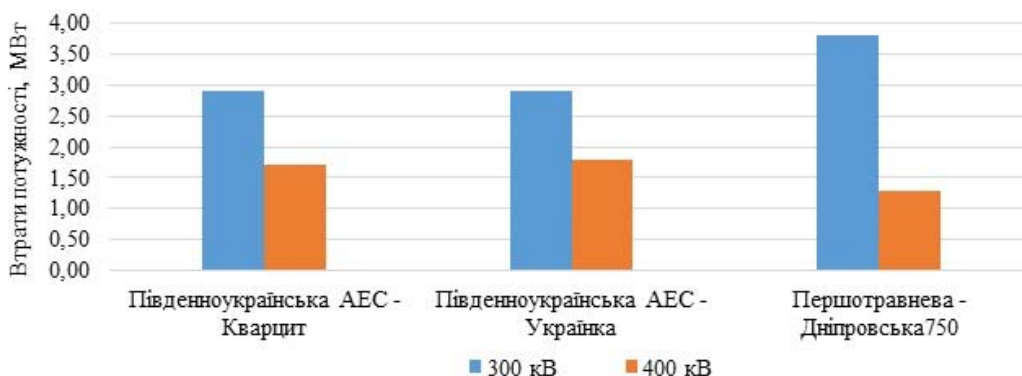


Рис. 3. Результат моделювання усталеного режиму роботи електричної мережі на напрузі 330 та 400 кВ (втрати потужності)

жності електрообладнання і зменшення сумарних втрат потужності в мережі.

У комплексі комп'ютерних програм, призначених для проектування електромереж енергосистем «ТЕЗАУРУС» створено модель мережі Дніпровського регіону ОЕС України на базі схеми 2004 року та виконано моделювання усталених режимів роботи електричної мережі напругою 330 та 400 кВ за умови температури 0° С. Цей регіон був обраний, оскільки тут розташовані найбільш потужні АЕС, які суттєво завантажують мережі 330 кВ.

З аналізу отриманих режимних параметрів встановлено, що переведення на напругу 400 кВ на 17 % знижує завантаженість ПЛ 330 кВ Першотравнева–Дніпровська 750, водночас зміна завантаженості двох інших ПЛ 330 кВ не суттєва. Однак, навіть незначна економія експлуатаційного ресурсу ЛЕП є важливою для тривалої надійної роботи енергосистеми.

Аналізом ефективності переведення на вищий рівень напруги обрано критерій сумарних втрат потужності мережі й завантаження таких найбільш завантажених повітряних ліній 330 кВ: Південноукраїнська АЕС–Кварцит, Південноукраїнська АЕС–Українка та Першотравнева–Дніпровська. В умовах задачі реконструкції мережі 330 кВ із переведенням її на клас напруги 400 кВ можна вибрати більш спроможні за струмом проводи, а також ті, що за своїми характеристиками будуть відповідати габариту опор ліній електропередачі. Через це для трьох зазначених ЛЕП було змінено тип проводу зі збільшенням пропускної здатності електропередачі.

На рис. 1–3 показано результат моделювання усталеного режиму роботи електричної мережі на напрузі 330 та 400 кВ.

Важливим критерієм вигідності проектного рішення у сфері експлуатації електричних мереж є зменшення втрат потужності ділянками електропередачі. Втрати активної потужності викликані великим перетіканням активної потужності ділянкою мережі. Результати моделювання (рис. 1–3) демонструють лінійний ефект між зменшенням завантаженості за струмом і зниженням втрат потужності лініями електропередачі.

У результаті моделювання встановлено, що переведення мережі на 400 кВ знижує значення сумарних втрат потужності мережі на 10,8 % або на 19,1 МВт, а отже, позитивний ефект щодо зниження сумарних втрат потужності в мережі за однакових умов розрахунку, зокрема температури середовища, складу та потужності генерації і навантаження вказує на наявність економічного ефекту від переведення мережі 300 кВ на напругу 400 кВ.

**Висновок.** У роботі проведено порівняльний аналіз типових параметрів ділянок електричної мережі 330 і 400 кВ, зроблено порівняння результатів розрахунку усталеного режиму на основі прикладних схем електричної мережі Дніпровського регіону ОЕС України за 2004 рік. Результатами дослідження виявлено позитивний ефект щодо зниження завантаженості ліній електропередачі внаслідок зміни класу номінальної напруги за близьких значень граничного струму в обох випадках. Сумарні втрати потужності мережею і окремо кожною ділянкою також демонструють тенденцію до зниження за однакових умов розрахунку.

З огляду на отримані результати рішенням проблеми відповідності викликам перспективного росту навантаження є реконструкція мереж 330 кВ зі зміною класу номінальної напруги на 400 кВ.

1. Нечасва Т. П. Цільові показники низьковуглецевого розвитку електроенергетики України. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2023. № 4 (74). С. 103–111. DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.4.2023.290937>
2. Енергетична стратегія України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність». Розпорядженням від 18 серпня 2017 р. № 605-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-%D1%80#>
3. ENTSO-E. URL: <https://transparency.entsoe.eu/>
4. Виконання комплексу робіт з реконструкції ПЛ 750 кВ ХАЕС-Жешув з переводом на напругу 400 кВ із реконструкцією ВРП 750 кВ ВП «ХАЕС» та встановленням АТ 750/400 кВ 45454000-4 Реконструкція. URL: <https://prozorro.gov.ua/tender/UA-2022-09-02-009619-a>

## INCREASING THE CAPACITY OF UKRAINE'S TRANSMISSION NETWORKS

**O.S. Bohomolova, D.V. Kravchenko**

National Technical University of Ukraine Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute,  
Beresteyskiy ave., 37, Kyiv, 03056, Ukraine  
e-mail: [bohomolovaos@ukr.net](mailto:bohomolovaos@ukr.net)

*In connection with the projected significant increase in electricity demand by 2030, as well as for the purpose of developing the electricity system and effective interaction of the IPS of Ukraine with the energy systems of the European Union, the article considers the need and feasibility of converting the Ukrainian power grids from 330 kV to 400 kV, comparing the technical characteristics of grids of different voltage classes in terms of reliability, stability and efficiency of such grids. The paper provides an applied analysis of the efficiency of switching 330 kV rated voltage networks to 400 kV voltage class by the criterion of increasing the capacity of electrical equipment and reducing total power losses in the network. On the example of the Dnipro region of the IPS of Ukraine, the complex of computer programs designed for the design of power grids of power systems "Thesaurus" was used to model and analyze the modes of operation of the power grid at 330 kV and 400 kV. As a result, it was found that an increase in the voltage level will lead to a decrease in the load of certain line sections by 17 %, while the value of total network losses will decrease by 10.8 %.*

Ref. 4, fig. 3.

**Key words:** power grid voltage, trunk power grids, power line, IPS of Ukraine.

1. Nechaieva T. P. Target indicators of Ukraine's low-carbon power sector development. *Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohii, ekolohiia*. 2023. No 4 (74). Pp. 103–111. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.4.2023.290937>
2. Energy Strategy of Ukraine until 2035 Security, Energy Efficiency, Competitiveness. Order of August 18, 2017, No. 605-r. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-%D1%80#> (Ukr)
3. ENTSO-E. URL: <https://transparency.entsoe.eu/>
4. Implementation of a set of works on the reconstruction of OHL 750 kV KhNPP-Rzeszow with transfer to 400 kV with the reconstruction of 750 kV SS KhNPP and installation of 750/400 kV AT 45454000-4 Reconstruction. URL: <https://prozorro.gov.ua/tender/UA-2022-09-02-009619-a> (Ukr)

Надійшла: 04.07.2024

Прийнята: 30.07.2024

Submitted: 04.07.2024

Accepted: 30.07.2024

УДК 621.315.1

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2024.68.075>

## МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ МОНІТОРИНГУ ВІДКЛАДЕНЬ ОЖЕЛЕДІ ТА ЗМІНИ СТІЛИ ПРОВИСАННЯ ПРОВІДІВ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ

**Т.Л. Кацадзе**, канд. техн. наук, **Н.В. Буслова**, канд. техн. наук, **К.М. Новіков**, **А.Д. Ніколаєва**  
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,  
пр. Берестейський, 37, Київ, 03056, Україна  
e-mail: [teymuraz@ukr.net](mailto:teymuraz@ukr.net)

*Представлено результати дослідження проблеми моніторингу стану проводу повітряної лінії електропередавання. Проаналізовано відомі підходи до формування пристрою моніторингу стріли провисання та відкладень ожеледі на проводах лінії. Показано, що один з найперспективніших підходів базується на вимірюванні кута нахилу кривої провисання проводу поблизу точки його закріплення на опорі. Показано, що однозначне співвідношення між кутом нахилу кривої провисання та стрілою провисання проводу дозволяє організувати непряме вимірювання робочої температури проводу за умови відсутності відкладень ожеледі. Показано, що облаштування пристрою моніторингу датчиком температури дозволить здійснювати контроль ваги відкладень ожеледі і, у разі необхідності, видавати сигнал для організації протиожеледних заходів. Модифікація пристрою з триосьовим гіроскопічним датчиком дозволяє додатково реалізувати моніторинг вітрового натиску на проводи повітряної лінії. В роботі представлено математичні моделі для вирішення зазначених задач моніторингу стану проводу. Бібл. 9, рис. 4.*

**Ключові слова:** повітряна лінія електропередавання, моніторинг стану проводу, стріла провисання, відкладення ожеледі.

**Вступ.** До сучасних систем передачі та розподілу електричної енергії висувають жорсткі вимоги щодо надійності та безперебійності роботи. Аварійні відключення устаткування електричних мереж можуть призвести до недовідпустки електричної енергії та відповідних економічних збитків. Одним з найуразливіших елементів електричних мереж є повітряні лінії електропередавання, які зазнають активного впливу оточуючого середовища. Атмосферні явища – вітер та відкладення ожеледі на проводах – зумовлюють збільшення навантаження на конструктивні елементи лінії та можуть призвести до обриву проводів та інших аварійних випадків в процесі експлуатації повітряних ліній електропередавання. Тому актуальною науково-технічною задачею залишається проблема моніторингу відкладень ожеледі та стріли провисання проводу з метою попередження виникнення недопустимих ожеледно-вітрових навантажень на проводи повітряних ліній.

Крім того, слід зважати та те, що стріла провисання проводу визначає зарядну ємність електропередачі і її зміна в процесі експлуатації повітряної лінії впливає на баланс реактивної потужності в магістральних електричних мережах, ємнісну складову струмів короткого замикання тощо [1]. Тому моніторинг стріли провисання проводу дозволить організувати ефективну компенсацію надлишкової зарядної потужності електропередач надвисокої номінальної напруги, створюючи саморегульовану систему адаптивних електропередач, забезпечуючи гнучкість електричної системи, збільшення пропускної здатності магістральної мережі, раціональне регулювання напруги в електричній системі тощо. Урахування зміни ємнісної складової струмів короткого замикання дозволить збільшити точність визначення місця аварії та зменшити показники надійності SAIDI та SAIFI для розподільних електричних мереж.

**Мета роботи** полягає у розробці математичних моделей та алгоритмів роботи основного блоку пристрою моніторингу відкладень ожеледі та стріли провисання проводу повітряної лінії електропередавання.

**Матеріали дослідження.** До основних вимог до конструктивного виконання пристрою моніторингу відкладень ожеледі та стріли провисання проводів повітряної лінії слід віднести конструктивну надійність та точність вимірювань, простоту виконання та економічність.





Зазначимо, що задача моніторингу стану проводу повітряної лінії не нова, на теперішній час відомо багато підходів до методів вимірювання провисання проводу в систем моніторингу стану проводу [2–4]. Такі методи поділяють на прямі та непрямі. До прямих слід віднести методи безпосереднього вимірювання провисання проводу та відкладень ожеледі із застосуванням лазерних сканерів, засобів комп'ютерного зору, GPS-датчиків тощо. Непрямі методи базуються на співвідношеннях між стрілою провисання проводу та механічними, термічними, електричними або магнітними параметрами повітряної лінії. Такі методи передбачають розрахунок провисання проводу за результатами вимірювань напруження проводу, кута нахилу кривої провисання проводу, робочої температури та струму, різниці атмосферного тиску в точці закріплення проводу та в нижній точці провисання, напруження магнітного поля у поверхні землі під проводом, частоти власних коливань проводу тощо. Один з найпростіших і водночас точних і надійних методів визначення провисання проводу базується на вимірюванні кута нахилу кривої провисання проводу біля точки закріплення на опорі [5–8].

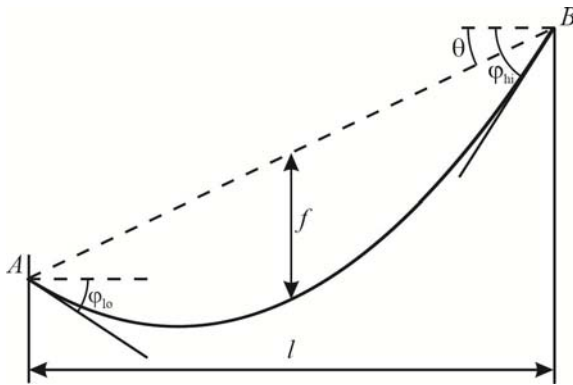


Рис. 1. Вимірювання кута нахилу кривої провисання проводу біля точки закріплення на опорі

Застосування даного методу проілюстровано на рис. 1, де  $A, B$  – точки закріплення проводу на «нижній» та «верхній» опорах відповідно;  $\theta$  – кут, який утворює з горизонталлю пряма, що поєднує точки закріплення проводу на суміжних опорах;  $\varphi_{lo}, \varphi_{hi}$  – кути нахилу дотичних до кривої провисання проводу біля точок закріплення на «нижній» та «верхній» опорах відповідно;  $l$  – довжина прогону;  $f$  – стріла провисання посередині прогону.

За відсутності перепаду висоти точок закріплення проводу на суміжних опорах прогону тангенс кута нахилу дотичної до кривої провисання проводу визначається виразом

$$\tan[\varphi] = \text{Sinh}\left[\frac{\gamma l}{2\sigma}\right] = \text{Sinh}\left[\frac{4f}{l}\right], \quad (1)$$

де  $\gamma$  – питоме вертикальне навантаження, яке зазнає провід;  $\sigma$  – напруження проводу в нижній точці провисання;  $l$  – довжина прогону;  $f$  – стріла провисання.

З виразу (1) впливає співвідношення між стрілою провисання та кутом дотичної в точці закріплення проводу на опорі:

$$f = \frac{l}{4} \text{ArcSinh}[\tan[\varphi]], \quad (2)$$

За наявності перепаду висоти точок закріплення проводу в прогоні вираз (2) визначає співвідношення між кутом нахилу дотичної до кривої провисання проводу та стрілою провисання великого або малого еквівалентного прогонів відповідно до місця встановлення датчику біля точки закріплення проводу на «верхній» або «нижній» опорі відповідно. У разі розташування датчику біля точки закріплення проводу на «верхній» опорі стріла провисання проводу визначається виразом

$$\begin{aligned} f &= \frac{l}{4} \left( \text{ArcSinh}[\tan[\varphi_{hi}]] - 2 \tan[\theta] \right) + \frac{\sigma}{\gamma} \left( 1 + \frac{1}{2} \text{ArcSinh}[\tan[\varphi_{hi}]] \tan[\theta] - \text{Cosh}[\tan[\theta]] \right) = \\ &= \frac{l}{8} \left( \text{ArcSinh}[\tan[\varphi_{hi}]] - 2 \tan[\theta] + \sqrt{\text{ArcSinh}[\tan[\varphi_{hi}]]^2 + 4 \tan[\theta]^2 + 8(1 - \text{Cosh}[\tan[\theta]])} \right), \end{aligned} \quad (3)$$

де  $\varphi_{hi}$  – кут нахилу дотичної до кривої провисання проводу біля точки закріплення на «верхній» опорі;  $\theta$  – кут, який утворює з горизонталлю пряма, що поєднує точки закріплення проводу на суміжних опорах.

Своєю чергою, у разі розташування датчика біля точки закріплення проводу на «нижній» опорі вираз для визначення стріли провисання проводу набуває вигляду



$$f = \frac{l}{4} \left( \text{ArcSinh}[\text{Tan}[\varphi_{lo}]] + 2 \text{Tan}[\theta] \right) - \frac{\sigma}{\gamma} \left( 1 + \frac{1}{2} \text{ArcSinh}[\text{Tan}[\varphi_{lo}]] \text{Tan}[\theta] - \text{Cosh}[\text{Tan}[\theta]] \right) = \quad (4)$$

$$= \frac{l}{8} \left( \text{ArcSinh}[\text{Tan}[\varphi_{lo}]] + 2 \text{Tan}[\theta] + \sqrt{\text{ArcSinh}[\text{Tan}[\varphi_{lo}]]^2 + 4 \text{Tan}[\theta]^2 - 8(1 - \text{Cosh}[\text{Tan}[\theta]])} \right),$$

де  $\varphi_{lo}$  – кут нахилу дотичної до кривої провисання проводу біля точки закріплення на «нижній» опорі.

Для типових прогонів завдовжки до 800 м вирази (2) – (4) можна спростити та подати у вигляді

$$f = \frac{l}{4} \text{Tan}[\varphi] \quad (5)$$

за відсутності перепаду висоти точок закріплення проводу;

$$f = \frac{l}{2} \left( \frac{\text{Tan}[\varphi_{hi}]}{2} - \text{Tan}[\theta] \right) + \frac{\sigma}{2\gamma} \text{Tan}[\theta] (\text{Tan}[\varphi_{hi}] - \text{Tan}[\theta]) = \frac{l}{4} (\text{Tan}[\varphi_{hi}] - \text{Tan}[\theta]) \quad (6)$$

у разі розташування датчика поблизу точки закріплення проводу на «верхній» опорі;

$$f = \frac{l}{2} \left( \frac{\text{Tan}[\varphi_{lo}]}{2} + \text{Tan}[\theta] \right) - \frac{\sigma}{2\gamma} \text{Tan}[\theta] (\text{Tan}[\varphi_{lo}] - \text{Tan}[\theta]) = \frac{l}{4} (\text{Tan}[\varphi_{lo}] + \text{Tan}[\theta]) \quad (7)$$

у разі розташування датчика поблизу точки закріплення проводу на «нижній» опорі.

На рис. 2 представлені залежності кута нахилу датчика від стріли провисання проводу в прогонах повітряної лінії 100–450 м. З рис. 2 випливає, що взаємна залежність кута нахилу датчика та стріли провисання близька до лінійної. Із збільшенням довжини прогону, очевидно, зменшується кут нахилу проводу. Відповідно до представлених даних збільшення стріли провисання на 1 м зумовлює зміну кута нахилу проводу приблизно на  $2^\circ$  в прогоні завдовжки 100 м та приблизно на  $0,5^\circ$  в прогоні довжиною 450 м.

У роботі [8] показано, що зміну стріли провисання проводу у прогоні моделює рівняння стану проводу у формі

$$\frac{8E}{3l^2} (f^2 - f_0^2) - \frac{l^2}{8} \left( \frac{\gamma}{f} - \frac{\gamma_0}{f_0} \right) = \alpha E (t - t_0), \quad (8)$$

де  $l$  – довжина прогону;  $\alpha$  – температурний коефіцієнт лінійного здовження проводу;  $E$  – модуль пружності проводу;  $f, f_0$  – стріли провисання в поточному та вихідному режимах;  $\gamma, \gamma_0$  – питома навантаження, яке зазнає провід в поточному та вихідному режимах;  $t, t_0$  – робоча температура проводу в поточному та вихідному режимах відповідно.

Зазначимо, що як вихідний режим проводу можна обирати будь-який режим, параметри якого (робоча температура проводу, питома навантаження та стріла провисання) відомі заздалегідь.

Якщо провід зазнає навантаження виключно від власної ваги, тобто за відсутності відкладень ожеледі на проводі вираз (8) дозволяє сформулювати співвідношення між кутом нахилу кривої провисання робочою температурою проводу. За відсутності перепаду висоти точок закріплення проводу на суміжних опорах з урахуванням (5) таке співвідношення має вигляд

$$t = t_0 + \frac{1}{\alpha} \left( \frac{\gamma_1}{E} \frac{l}{2} \left( \frac{l}{4f_0} - \text{Cot}[\varphi] \right) + \frac{\text{Tan}[\varphi]^2}{6} - \frac{8}{3} \left( \frac{f_0}{l} \right)^2 \right), \quad (9)$$

де  $\gamma_1$  – питома навантаження від власної ваги проводу.

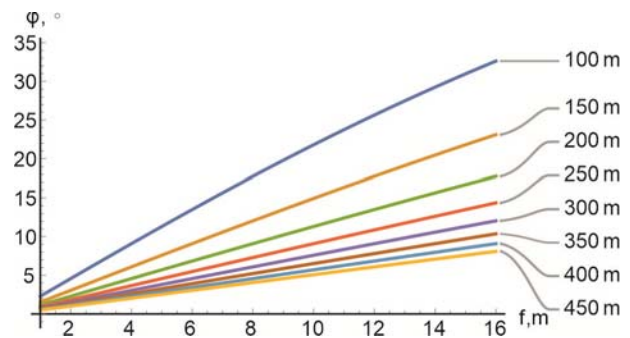
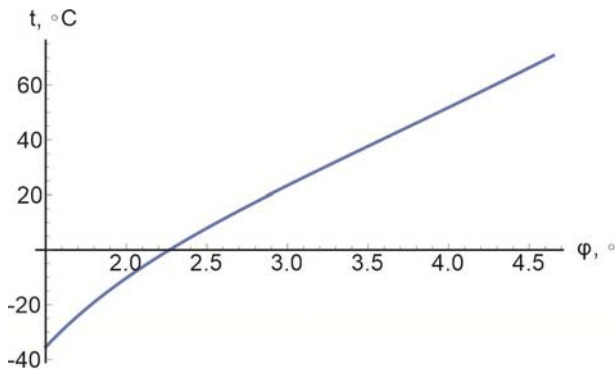


Рис. 2. Залежності кута нахилу датчика від стріли провисання проводу в прогонах повітряної лінії 100–450 м



**Рис. 3.** Взаємна залежність робочої температури проводу та кута нахилу кривої провисання в прогоні завдовжки 200 м типової повітряної лінії

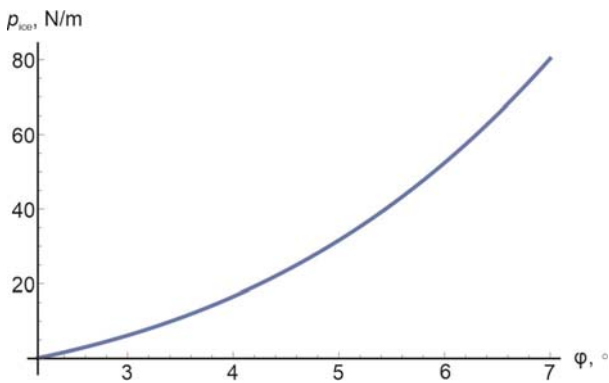
Якщо прилад моніторингу стану проводу додатково оснастити датчиком температури, з'являється можливість організувати контроль відкладень ожеледі на проводах повітряної лінії. Дійсно, з (8) впливає залежність

$$\gamma = \frac{f}{f_0} \left( \gamma_0 + \frac{8f_0}{l^2} \left( \frac{8E}{3l^2} (f^2 - f_0^2) - \alpha E (t - t_0) \right) \right). \quad (10)$$

Вагу відкладень ожеледі на одиницю довжини проводу можна визначити за виразом

$$p_{\text{ice}} = \frac{f}{f_0} \left( \gamma_0 + \frac{8f_0}{l^2} \left( \frac{8E}{3l^2} (f^2 - f_0^2) - \alpha E (t - t_0) \right) \right) F - gM_0, \quad (11)$$

де  $F$  – розрахунковий переріз проводу;  $M_0$  – погонна маса проводу;  $g$  – прискорення вільного падіння.



**Рис. 4.** Залежність ваги відкладень ожеледі від кута нахилу кривої провисання в прогоні завдовжки 200 м типової повітряної лінії

На рис. 3 представлена взаємна залежність робочої температури проводу та кута нахилу кривої провисання в прогоні завдовжки 200 м типової повітряної лінії напругою 110 кВ, виконаної проводом марки АС-240/32. Аналіз інформації, наведеної на рис. 3 свідчить про нелінійний характер залежності робочої температури проводу від кута нахилу кривої провисання. Разом з тим в області робочих температур +20°C та більше асимптотично наближається до лінійної. При цьому зміна кута нахилу кривої провисання проводу на 1° відповідає зміні робочої температури приблизно на 30°C.

На рис. 4 представлено залежність ваги відкладень ожеледі від кута нахилу кривої провисання в прогоні завдовжки 200 м типової повітряної лінії напругою 110 кВ, виконаної проводом марки АС-240/32.

Таким чином, у разі, коли вага відкладень ожеледі досягає певного критичного значення пристрій має подавати сигнал щодо організації заходів боротьби з відкладенням ожеледі, наприклад, топлення ожеледі. Очевидно, що контроль відкладень ожеледі за виразом (11) слід виконувати в діапазоні низьких температур, за яких спостерігаються відкладення ожеледі.

Модифікація пристрою із встановленням триосьового гіроскопічного датчика

дозволить здійснювати моніторинг вітрового навантаження, відхилення площини провисання проводу від вертикалі та взаємного наближення фазних проводів лінії. Для розв'язання такої задачі слід визначати вертикальну та горизонтальну проекції стріли провисання проводу, відхиленого під натиском вітру. Наприклад, за відсутності перепаду висоти точок закріплення проводу на суміжних опорах проекції стріли провисання визначаються виразами

$$f_{\text{ver}} = \frac{l}{4} \text{AcrSinh}[\text{Tan}[\varphi_{\text{ver}}]]; \quad f_{\text{hor}} = \frac{l}{4} \text{AcrSinh}[\text{Tan}[\varphi_{\text{hor}}]], \quad (12)$$

де  $\varphi_{\text{ver}}$ ,  $\varphi_{\text{hor}}$  – кути нахилу кривої провисання проводу у вертикальній та горизонтальній площині.

Для такого режиму навантаження від натиску вітру на одиницю довжини проводу слід визначати за виразом

$$P_{\text{wind}} = \sqrt{\left( \frac{f'}{f_0} \left( \gamma_0 + \frac{8f_0}{l^2} \left( \frac{8}{3} \frac{E}{l^2} (f'^2 - f_0^2) - \alpha E (t - t_0) \right) \right) F \right)^2 - (gM_0)^2}. \quad (13)$$

У формулі (13)  $f'$  – стріла провисання проводу на відхилений під натиском вітру площині:

$$f' = \frac{l}{8} \frac{\sqrt{2 - \text{Cos}[2(\varphi_{\text{ver}} - \varphi_{\text{hor}})] - \text{Cos}[2(\varphi_{\text{ver}} + \varphi_{\text{hor}})]}}{\text{Cos}[\varphi_{\text{ver}}] \text{Cos}[\varphi_{\text{hor}}]}. \quad (14)$$

Відповідно до необхідності безперервного моніторингу стріли провисання проводу можна передбачити два алгоритми функціонування пристрою. Перший алгоритм передбачає роботу пристрою тільки в температурних режимах утворення ожеледі, другий алгоритм передбачає постійний моніторинг стріли провисання проводу та моніторинг відкладень ожеледі за умови, коли температура повітря знаходиться в діапазоні утворення ожеледі.

Зазначимо, що запропонований прототип пристрою може виконувати додаткові моніторингові функції, наприклад, відслідковувати виникнення вібрації та галопування проводів.

### Висновки.

1. Жорсткі вимоги до забезпечення надійності передачі та розподілу електричної енергії зумовлюють актуальність проблеми моніторингу стану проводу повітряної лінії для попередження виникнення аварійних ситуацій, обумовлених екстремальними кліматичними навантаженнями та впливами. Результати такого моніторингу додатково дозволять організувати коригування електричних параметрів електропередач відповідно до поточних експлуатаційних умов та забезпечити формування адаптивної саморегульованої електричної мережі.
2. Серед широкого спектру відомих підходів до вирішення задачі моніторингу стану проводу повітряної лінії вимогам простоти, надійності, точності та економічності відповідає метод вимірювання кута нахилу провисання проводу поблизу точки його закріплення на опорі. Однозначне співвідношення між кутом нахилу та стрілою провисання проводу дозволяє побудувати пристрій моніторингу, основним елементом якого є гіроскопічний датчик.
3. Запропоновані математичні моделі дозволяють організувати безперервний моніторинг стану проводу повітряної лінії, зокрема визначати поточне значення стріли провисання, робочої температури проводу, ваги відкладень ожеледі та вітрового натиску на провід.
4. В ідеальному випадку за умови рівномірного розподілу навантаження вздовж проводу, очевидно, достатньо встановлювати один пристрій на кожній фазній конструкції в межах анкерованої ділянки. Проте, з урахуванням нерівномірності відкладень ожеледі та поривів вітру кількість пристроїв необхідно збільшувати, що потребує проведення додаткових досліджень щодо оптимізації (мінімізації) необхідної кількості пристроїв.
5. Робота пристрою буде ефективнішою, якщо організувати канали передачі інформації оператору системи. До того ж, урахування особливостей провисання проводу за нерівномірного відкладення ожеледі, потребує організації певної координації інформації, отриманої від пристроїв, встановлених на проводах однієї фази в межах анкерованої ділянки.

1. Кацадзе Т.Л. та ін. Визначення зарядної ємності лінії електропередавання з урахуванням провисання проводу. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2024. Вип. 67. С. 39–47. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2024.67.039>
2. IEEE Standard 524 -2016. IEEE guide for the installation of overhead transmission line conductor. Official edition. NY: Piscataway, 2016. 160 p.
3. Measurement and monitoring of overhead transmission line sag in smart grid: A review / A. U. Mahin et al. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1049/gtd2.12271> (date of access: 27.03.2024).
4. Chen Y., Ding X. A survey of sag monitoring methods for power grid transmission lines. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1049/gtd2.12778> (date of access: 27.03.2024).

5. Research on Sag Online Monitoring System for Power Transmission Wire Based on Tilt Measurement / X. Xiao et al. *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*. 2013. Vol. 2, No. 1. Pp. 6–11. DOI: <https://doi.org/10.12720/sgce.2.1.6-11> (date of access: 27.03.2024).
6. Research on the Continuous Monitoring of the Sag of Overhead Electricity Transmission Cables Based on the Measurement of their Slope / D. Sacerdotianu et al. *2018 International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE)*. 2018. Pp. 1–5.
7. Malhara S., Vittal V. Mechanical State Estimation of Overhead Transmission Lines Using Tilt Sensors. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2010. Vol. 25, No. 3. Pp. 1282–1290. DOI: <https://doi.org/10.1109/tpwrs.2009.2038703> (date of access: 27.03.2024).
8. Power line sag monitor: patent US6205867B1 United States: G01C9/00. Published on 27.03.2003. 12 p.
9. Кацадзе Т.Л. Основи механічних розрахунків повітряних ліній електропередавання. Підручник. Київ : КІП ім. Ігоря Сікорського, Вид-во "Політехніка", 2019. 336 с.

## MATHEMATICAL MODELS FOR MONITORING ICE-COATING AND SAGGING ON OVERHEAD TRANSMISSION POWER LINES

T. Katsadze, N. Buslova, K. Novikov, A. Nikolaeva

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

Beresteiskiy ave., 37, Kyiv, 03056, Ukraine

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

*The paper presents the results of studying the problem of monitoring the condition of an overhead power line wire. The known approaches to the formation of a device for monitoring the sagging boom and ice-coating on the line wires are analysed. It is shown that one of the most promising approaches is based on measuring the angle of inclination of the wire sagging curve near the point of its fixation on the support. It is shown that an unambiguous correlation between the slope angle of the sagging curve and the wire sagging arrow allows for an indirect measurement of the operating temperature of the wire in the absence of ice deposits. It has been shown that equipping the monitoring device with a temperature sensor will allow monitoring the weight of ice-coating and, if necessary, issuing a signal for organising anti-icing measures. Modification of the device with a three-axis gyroscopic sensor allows for additional monitoring of wind pressure on overhead line wires. The paper presents mathematical models for solving these problems of monitoring the condition of the wire.*

**Keywords:** overhead power line, wire condition monitoring, sag monitoring, ice-coating monitoring.

1. Katsadze T. et al. Determination Of The Overhead Power Lines Charging Capacitance Taking In Account The Cable Sagging. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky NAN Ukrainy*. 2024. Vol. 67. Pp. 39–47. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2024.67.039> (Ukr)
2. IEEE Standard 524 -2016. IEEE guide for the installation of overhead transmission line conductor. Official edition. NY: Piscataway, 2016. 160 p.
3. Measurement and monitoring of overhead transmission line sag in smart grid: A review. A. U. Mahin et al. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1049/gtd2.12271> (date of access: 27.03.2024).
4. Chen Y., Ding X. A survey of sag monitoring methods for power grid transmission lines. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1049/gtd2.12778> (date of access: 27.03.2024).
5. X. Xiao et al. Research on Sag Online Monitoring System for Power Transmission Wire Based on Tilt Measurement *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*. 2013. Vol. 2, No. 1. Pp. 6–11. DOI: <https://doi.org/10.12720/sgce.2.1.6-11> (date of access: 27.03.2024).
6. D. Sacerdotianu et al. Research on the Continuous Monitoring of the Sag of Overhead Electricity Transmission Cables Based on the Measurement of their Slope. *2018 International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE)*. 2018. Pp. 1–5.
7. Malhara S., Vittal V. Mechanical State Estimation of Overhead Transmission Lines Using Tilt Sensors. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2010. Vol. 25, No. 3. Pp. 1282–1290. DOI: <https://doi.org/10.1109/tpwrs.2009.2038703> (date of access: 27.03.2024).
8. Power line sag monitor : patent US6205867B1 United States : G01C9/00. Published on 27.03.2003. 12 p.
9. Katsadze T. Fundamentals of mechanical calculations of overhead power lines: Handbook. Kyiv: KPI im. Ihoria Sikorskoho, Politehnika, 2019. 336 p. (Ukr)

Надійшла: 20.08.2024

Прийнята: 27.08.2024

Submitted: 20.08.2024

Accepted: 27.08.2024

## НАПІВПРОВІДНИКОВІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

УДК 62-83-52:681.325-181.4

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2024.68.081>

### ПЕРЕТВОРЮВАЧ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА ТА ЕЛЕКТРОПРИВОДА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

**Р.А. Чепкунов**, канд. техн. наук

Науково-виробниче підприємство «Електронік, ЛТД», ТОВ,

вул. Руставі, 5 - 204, Запоріжжя, 69055, Україна

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

*Розглянуто перетворювач, який може забезпечувати керування як асинхронного електропривода, так і електропривода постійного струму. В асинхронному електроприводі керування трифазним перетворювачем частоти здійснюється за реактивною потужністю, в електроприводі постійного струму напруга якоря формується шляхом широтно-імпульсної модуляції двох плечей перетворювача частоти, а напруга обмотки збудження – широтно-імпульсною модуляцією третього плеча. Забезпечується якісне керування електроприводами. Бібл. 10, рис. 3.*

**Ключові слова:** асинхронний електропривод, реактивна потужність, двигун постійного струму.

**Вступ.** Асинхронний електропривод (ЕП) останнім часом витісняє ЕП постійного струму в більшості промислових застосувань [1]. Переважно ЕП постійного струму залишилися в реверсивних ЕП, особливо металургійних: у прокатних станах і відвідних рольгангах, при переміщенні електродів в сталеплавильних печах, також вони ще використовуються в електротранспорті – електропоїздах, трамваях, тролейбусах, електромобілях; в крановому, верстатному та інших електроприводах. З вирішенням питання якості регулювання в реверсивних асинхронних ЕП [2] з'явилася можливість заміни ЕП постійного струму на більш надійний і дешевший асинхронний ЕП. Однак у вже працюючих механізмах ця заміна може бути дорогою. Тому виникає необхідність використання нового, більш якісного ЕП постійного струму. У нових ЕП виникає потреба використання асинхронного ЕП та ЕП постійного струму. У працюючих ЕП заміна ЕП постійного струму на асинхронний може проводитися в два етапи: на першому замінюється перетворювач з відпрацюванням технології його використання, а на другому можлива заміна двигуна. Тому доцільно мати універсальний перетворювач, який може керувати як асинхронним двигуном, так і двигуном постійного струму. Водночас у разі заміни ЕП схема перетворювача залишається незмінною, а змінюється тільки програма мікропроцесорного керування.

**Метою роботи** є опис універсального перетворювача для асинхронного ЕП і ЕП постійного струму, його силової частини і системи керування.

**Виклад основного матеріалу.** Структурна схема універсального ЕП показана на рис. 1, де кола підключення двигуна постійного струму до інвертора перетворювача частоти (ПЧ) позначені пунктиром. Випрямляч, який може бути загальним для ряду ЕП, на рисунку не показано. Якщо асинхронний двигун підключений до трьох фаз інвертора ПЧ, то якір двигуна постійного струму – до двох фаз, а обмотка збудження – між третьою фазою і загальною точкою кола постійного струму. Від двигунів позначені зв'язки до датчика швидкості, якщо такий передбачено. Оскільки його може і не бути, його кола позначені також пунктиром.

Схема регулювання асинхронного ЕП відповідає регулюванню за реактивною потужністю [2]. Така схема забезпечує безінерційний реверс й оптимальне за швидкістю регулювання швидкості двигуна.









$$\begin{aligned}
 I_{RV} &= -I_a \cos\theta_{-a} + \frac{1}{\sqrt{3(I_a + 2I_c) \sin\theta_{-a}}}, & I_{XV} &= I_a \sin\theta_{-a} + \frac{1}{\sqrt{3(I_a + 2I_c) \cos\theta_{-a}}}; \\
 I_{RV} &= I_c \cos\theta_c + \frac{1}{\sqrt{3(2I_a + I_c) \sin\theta_c}}, & I_{XV} &= -I_c \sin\theta_c + \frac{1}{\sqrt{3(2I_a + I_c) \cos\theta_c}}; \\
 I_{RV} &= [(I_a + I_c) \cos\theta_{-b} + \frac{1}{\sqrt{3(I_a - I_c) \sin\theta_{-b}}}, \\
 I_{XV} &= [-(I_a + I_c) \sin\theta_{-b} + \frac{1}{\sqrt{3(I_a - I_c) \cos\theta_{-b}}}.
 \end{aligned}$$

Струм  $I$  дорівнює:

$$i = \sqrt{I_{RV}^2 + I_{XV}^2}.$$

Таким чином, зменшується похибка визначення струму, його активної і реактивної складових і підвищується якість регулювання в області низьких частот.

Функціональні блоки виконують такі операції:  $F_1$  – визначає значення заданої реактивної потужності, де  $L_c, L_r$  – індуктивності статора і ротора,  $\Psi_{r,z}$  – значення потокозчеплення ротора, що задається,  $\omega = 2\pi f$ ;  $F_2$  – визначає активну складову струму ротора.

$$I_{RE} = \sqrt{I^2 - \frac{UI_{XV} - I^2 \omega L_c}{\omega L_r}}.$$

Значення  $I_{RE}$  обчислюється без урахування знаку. Знак струму  $I_{RE}$  залежить від заданого напрямку обертання АД і від того, в якому режимі він працює, двигунному чи генераторному.

На рис. 1 також позначено: КЗІ – керований задатчик інтенсивності, який керує частотою  $f_z$ , пропорційною до заданої швидкості  $n_z$ : обмежує темп її зміни за високої швидкості зміни частоти, яка задається на вході задатчика інтенсивності  $F_z$ , забороняє її збільшення в разі перевищення струмом  $I$  допустимого значення або знижує її в разі великого перевищення, забороняє її зниження в разі перевищення вхідною напругою інвертора  $U_d$  допустимого значення;  $k_{IR}$  – коефіцієнт ІР-компенсації, який збільшує напругу перетворювача на величину падіння напруги на внутрішніх опорах АД за струму  $I$ ;  $\sim k_i$  – коефіцієнт зворотного зв'язку за змінною складовою струму  $I_{XV}$  для забезпечення стійкості системи автоматичного регулювання на низьких частотах ПЧ.

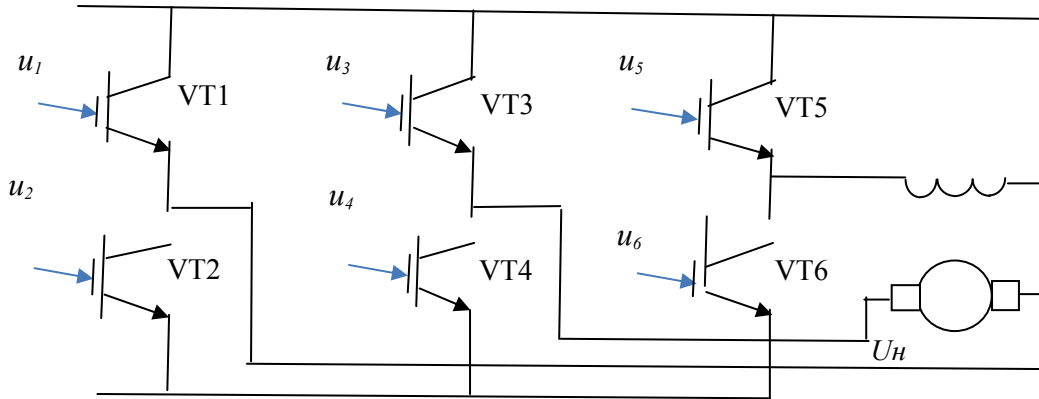
У представленому в схемі інтегральному регуляторі з коефіцієнтом  $k_{int}$  вихідний сигнал не змінюється у визначеному інтервалі малих частот навколо нульового значення  $f_{min} \leq f \leq f_{max}$ .

Під час роботи перетворювача на двигун постійного струму сигналами зворотного зв'язку є струм якоря  $I_a$  і струм обмотки збудження  $I_{\phi}$  (сигнали ЕП постійного струму показано пунктиром). Обмеження за струмом і обмеження за напругою на керованому задатчику інтенсивності КЗІ і ІР-компенсація аналогічні. Після ІР-компенсації задане значення швидкості помножується на коефіцієнт  $\Phi$  і надходить на вхід регулятора, де порівнюється з напругою якоря, яка визначається як добуток напруги  $U_d$  на коефіцієнт модуляції  $k_{mod}$ , і після множення на коефіцієнт посилення регулятора напруги  $K_U$  подається на регулятор струму. На рисунку він пропорційно-інтегральний з постійними часу  $T_1, T_0$ . КЗІ також формує задане значення струму обмотки збудження  $I_{\phi,z}$ , яке визначає роботу ЕП у першій зоні регулювання у разі постійного потокозчеплення ротора, або в другій зоні – у разі зменшення  $I_{\phi,z}$  і збільшення швидкості двигуна  $n$ .

Особливістю регулятора струму є вузол обмеження струму на граничному рівні  $I_{гран}$ , який може бути близьким до номінального. При  $I < I_{гран}$  від'ємний зворотний зв'язок за струмом відключається, що підвищує швидкодію системи регулювання [3].

Наступною особливістю системи регулювання є подвоєння частоти модуляції напруги якоря відносно частоти переключення транзисторів мостового широтно-імпульсного перетворювача постійної напруги [5], що дає змогу в два рази знизити пульсації напруги і струму без збільшення втрат у транзисторах перетворювача у разі їхніх переключень.

На транзистори кожного плеча перетворювача VT1, VT2 і VT3, VT4 (рис. 2) із невеликою затримкою, необхідною для відновлення запираючих властивостей транзисторів, які виходять із роботи, подають протилежні керуючі сигнали, а напруга навантаження перетворювача  $U_H$  тієї чи іншої полярності визначається керуючими сигналами на діагонально розміщених транзисторах перетворювача.



**Рис. 2.** Протилежні керуючі сигнали, що подаються на транзистори кожного плеча перетворювача VT1, VT2 і VT3, VT4

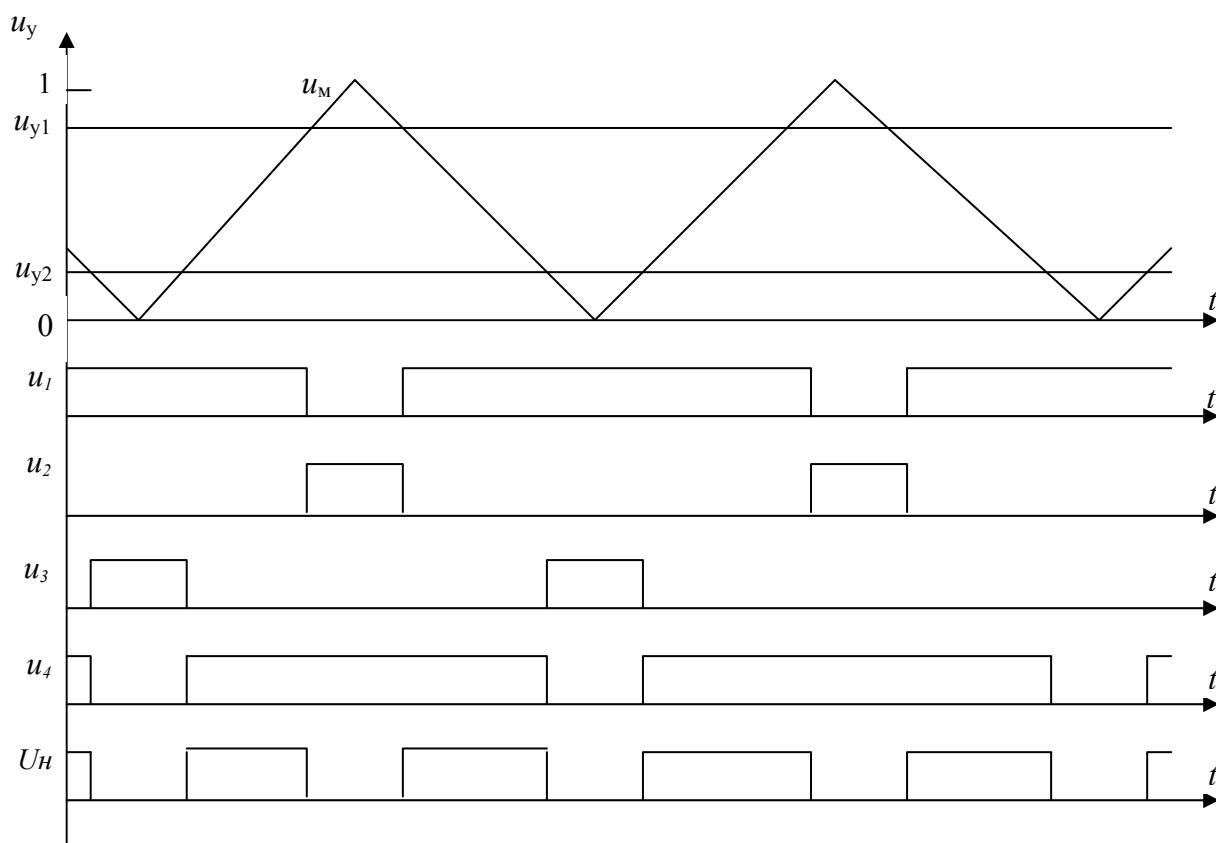
У відомому способі керування [6, 7] ці сигнали подають синхронно, і частота імпульсів напруги навантаження дорівнює частоті включення транзисторів.

У новому способі керування ці сигнали подають зі зміщенням один відносно другого на половину періоду їхнього слідування, що дає змогу збільшити у два рази частоту слідування імпульсів напруги навантаження відносно частоти включення транзисторів. Це видно з діаграми керуючих сигналів  $u_1$ ,  $u_2$ ,  $u_3$ ,  $u_4$  на транзисторах плечей VT1, VT2 і VT3, VT4 (рис. 3). Вихідна напруга перетворювача  $U_H$  утворюється за однойменної наявності відпираючих сигналів  $u_1$ ,  $u_4$  на діагонально розміщених транзисторах VT1, VT4 (сигналів високого рівня, затримка сигналів у разі переключення транзисторів на рисунку не показана через її малість). З огляду на те, що керуючі сигнали на транзисторах VT1, VT4 зміщені один відносно другого на половину періоду їхнього слідування, утворюються дві паузи у вихідній напрузі перетворювача, а не одна, як у відомому способі. У разі подвоєння числа пауз у напрузі навантаження відповідно подвоюються число і частота слідування імпульсів напруги  $U_H$ . Діаграма на рисунку зверху демонструє формування керуючих сигналів на транзисторах. Паузи у вихідній напрузі перетворювача утворюються під час виходу модулюючого сигналу  $u_m$ , який змінюється від нуля до одиниці і навпаки, за зону, яка визначається сигналами  $u_{y1}$ ,  $u_{y2}$ . Водночас число пауз у напрузі  $U_H$  і частота слідування імпульсів напруги  $U_H$  подвоюються. Таким чином, частота модуляції напруги якоря відносно частоти переключення транзисторів збільшується у два рази.

Для обмотки збудження з великою індуктивністю збільшення частоти модуляції для зменшення пульсацій струму не вимагається, і вона живиться від одного плеча перетворювача на транзисторах VT5, VT6.

Такий перетворювач випробувано на Запорізькому електроапаратному заводі під час роботи перетворювача для асинхронного електропривода ЕКТ4-100 на електродвигун постійного струму трамвая.

Тиристорні ЕП постійного струму, які широко застосовуються [8–10], поступаються за якістю регулювання ЕП постійного струму з широтно-імпульсною модуляцією транзисторів, на них можна реалізовувати більш швидкодіючі системи регулювання [8]. У них відсутні протипаралельні мости, і вони не потребують спеціальних мір захисту [9, 10], тому вони більш надійні. Але попри розглянуті нові рішення порівняно з відомими, ЕП постійного струму з широтно-імпульсною модуляцією транзисторів все одно можуть поступатися асинхронним ЕП за якістю, надійністю і вартістю. У перспективі процес заміни



**Рис. 3.** Діаграми керуючих сигналів  $u_1, u_2, u_3, u_4$  на транзисторах плечей VT1, VT2 і VT3, VT4

електроприводів буде продовжуватися, а розглянутий перетворювач може бути використаний у поетапній заміні – спочатку замінюється тільки перетворювач з відпрацюванням технологічних особливостей конкретного електропривода, а потім і електродвигун. Можливе і продовження роботи ЕП постійного струму з новим перетворювачем або використання його в нових ЕП постійного струму, які ще можуть бути. У будь-якому випадку є сенс використання такого універсального перетворювача, в якому для керування асинхронним двигуном і двигуном постійного струму змінюється тільки програма мікропроцесорного керування, а його схема залишається такою ж самою.

**Висновки.** Запропонований перетворювач забезпечує якісне регулювання і може поставитися як для асинхронного електропривода, так і для електропривода постійного струму. У разі заміни електроприводів постійного струму на асинхронний електропривод перетворювач дає змогу відпрацьовувати режими роботи електропривода до заміни електродвигунів.

1. Пересада С.М., Ковбаса С.М., Крижановский В.П., Бовкунович В.С. Система управління моментом асинхронного двигателя для тягових електроприводов. *Промислова електроенергетика та електротехніка*. 2007. № 1. С. 66–70.
2. Чепкунов Р.А. Реверсивний асинхронний електропривод з керуванням за реактивною потужністю. *Технічна електродинаміка*. 2024. № 1. С. 46–52. DOI: <https://doi.org/10.15407/techmed2024.01.046>
3. Чепкунов Р. Регулирование электроприводов с косвенным измерением скорости. Saarbrücken, Deutschland: LAP Lambert Academic Publishing, ISBN-13: 978-3-659-37144-8. 2015. 204 с.
4. Потапенко Е.М., Потапенко Е.Е. Робастые алгоритмы векторного управления. Запорожье: ЗНТУ, 2009. 352 с.
5. Чепкунов Р.А. Спосіб керування мостовим широтно-імпульсним перетворювачем постійної напруги. Патент на винахід України №119390, опубл. 10.06.2019. Бюл. № 11.
6. Чиженко И.М. Справочник по преобразовательной технике. Киев. Техника. 1978. 447 с.
7. Калінов А.П., Мельников В.О. Элементы автоматизованого електропривода. Кременчуг. 2014. 274 с.

8. Чепкунов А.І. Цифро-аналогові і мікропроцесорні системи управління силових напівпровідникових перетворювачів. Запоріжжя: ЗДІА, 2007, 119 с.
9. Перельмутер В.М., Сидоренко В.А. Системы управления тиристорными электроприводами постоянного тока. Москва: Энергоатомиздат, 1988. 304 с.
10. Андриенко П.Д. Защита реверсивных тиристорных преобразователей. Киев. Техніка. 1977. 144 с.

## CONVERTER OF ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE AND DC CURRENT ELECTRIC DRIVE

**R.A. Chepkunov**

Science-industrial enterprise “Elektronik, LTD”,  
st. Rustavy, 5 - 204, Zaporizhzhia, 69055, Ukraine  
e-mail: [elektronick.ltd@gmail.com](mailto:elektronick.ltd@gmail.com)

*A converter is considered that can provide control of both asynchronous electric drive and a DC electric drive. In an asynchronous electric drive control of a three-phase frequency converter by reactive power; in a DC electric drive the armature voltage is formed by PWM modulation of two arms of the frequency converter, and the voltage of the field winding is PWM modulated by the third arm of the converter. Ensures high-quality control of electric drives.*

Ref. 10, fig. 3.

**Keywords:** asynchronous electric drive, reactive tension, direct current motor.

1. Peresada S.M., Kovbasa S.N., Krizhanovskiy V.P., Bovkunovich V.S. Control system for moment of induction motor of pull electric driver. *Industrial Electronics and Electronics*. 2007. No 1. Pp. 66–70. (Rus)
2. Chepkunov R.A. Reversible asynchronous electric drive with reactive power control. *Technichna elektro-dinamika*. 2024. No 1. Pp. 46–52 (Ukr). DOI: <https://doi.org/10.15407/techmed2024.01.046>
3. Chepkunov R. Regulation of electric drives with indirect measuring of speed. Saarbrücken, Deutschland: LAP Lambert Academic Publishing, ISBN-13: 978-3-659-37144-8. 2015. 204 p. (Rus)
4. Potapenko E.M., Potapenko E.E. Robust algorithms of the vector control of electric drive. Zaporohzje: ZNTU. 2009. 352 p. (Rus)
5. Chepkunov R.A. Method of control of bridge with impulse converter. Patent of innovation №119390, Ukraine, publish 10.06.2019. Bull. No 11. (Ukr)
6. Chizhenko I.M. Handbook of converter engineering. Kiev. Tehnika. 1978. 447 p. (Rus)
7. Kalinov A.P., Melnikov V.O. Elements of automatization electric drive. Kremenchuk, 2014. 274 p. (Ukr)
8. Chepkunov A.I. Digital-analog and microprocessor control systems of power semiconductor converters. Zaporohzje: ZDIA. 2007. 119 p. (Ukr)
9. Perelmuter V.M., Sidorenko V.A. Control systems of thyristor electric drives of direct current. Moscow: Energoatomizdat, 1988. 304 p. (Rus)
10. Andrienko P.D. Protection of the reversible thyristor converters. Kiev. Tehnika. 1977. 144 p. (Rus)

Надійшла: 13.05.2024

Прийнята: 05.07.2024

Submitted: 13.05.2024

Accepted: 05.07.2024

УДК 621.314.5

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2024.68.087>

## ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕЗОНАНСНИХ СИСТЕМ ДЛЯ ОТРИМАННЯ ВИСОКОЇ НАПРУГИ НА НАВАНТАЖЕННІ ЄМНІСНОГО ТИПУ

**Д.В. Вінниченко**

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

*Робота присвячена порівняльному аналізу струмів в колах інверторів безтрансформаторних резонансних та трансформаторних резонансних і нерезонансних систем однакової потужності для отримання високої напруги на навантаженні ємнісного типу. Метою роботи є визначення типу системи, що характеризується найменшим середнім діючим струмом ключів інвертора. Отримано залежності струмів у колах інверторів від параметрів резонансних кіл, результати розрахунків за якими дають змогу стверджувати, що застосування безтрансформаторної схеми для забезпечення однакової потужності систем для отримання високої напруги на навантаженні ємнісного типу дозволить майже удвічі знизити середній діючий струм у колі інвертора. Проведено імітаційне моделювання процесів у досліджених схемах, яке підтверджує отримані теоретичні результати. Застосування високовольтних безтрансформаторних резонансних систем для отримання високої напруги на навантаженні ємнісного типу дасть змогу вдвічі знизити номінальні та максимально допустимі струмові характеристики силових елементів перетворювачів. Бібл. 10, рис.3.*

**Ключові слова:** електротехнічна система, змінний струм, індуктивно-ємнісний контур, послідовний резонанс, безтрансформаторний зарядний пристрій, добротність резонансного кола.

На сьогодні виникає гостра необхідність в швидкому проведенні діагностики якості ізоляції високовольтних мереж, поблизу яких здійснено руйнування конструкційних елементів на трасах кабельних ліній або технічних споруд. Згідно з [1] позапланові випробування якості ізоляції необхідно проводити після відновлення кабельних ліній та усунення механічних пошкоджень, що виникли в результаті воєнних дій, на трасах кабельних ліній або поблизу них, на яких виконуються будівельні роботи. Тому актуальною задачею є створення малогабаритних мобільних високовольтних установок для випробування міцності ізоляції високовольтних кабелів.

Згідно з [1] випробування електричної міцності ізоляції високовольтних кабелів 2 кВ–35 кВ проводиться випрямленою напругою від 70 кВ. Для того, щоб підняти постійну напругу на заданий рівень, необхідно зарядити ємність між жилою та екраном (для кабелів зі зшитого поліетилену питома ємність дорівнює 330 пФ/м із довжиною кабелю від 1 км до 20 км). Щоб зарядити таку ємність мінімум до 70 кВ, зазвичай застосовують високовольтний трансформатор з випрямлячем потужністю до десятків кіловат. Тобто великі розміри сучасних випробувальних установок зумовлені ємнісним характером електричного навантаження та високою напругою. Фактично така випробувальна установка є потужним високовольтним зарядним пристроєм ємнісного накопичувача енергії. Крім того, зарядні пристрої (ЗП) високовольтних ємнісних накопичувачів енергії (ЄНЕ) застосовуються в актуальних нині високовольтних технологіях. Наприклад, для отримання наноструктурних покриттів із карбідів титану та вольфраму [2] та отримання органічних кислот [3] використовують генератори імпульсних струмів [4], що забезпечують напругу до 50 кВ, для яких зниження маси та габаритів зарядних пристроїв також актуальні. Для зниження масо-габаритних характеристик систем для отримання високої напруги на навантаженні ємнісного типу в статті [5] запропоновано використання високодобротних резонансних систем та відмову від високовольтного трансформатора.

У резонансних системах отримання високої постійної напруги на ємнісному навантаженні, яким є ємність ізоляції високовольтних кабелів, виникають ситуації енергообміну між конденсатором резонансного кола та ємністю ізоляції. Аналіз процесів енергообміну конденсаторів проведено в [6]. Але наведені методи аналізу не дають змогу отримати вирази для



розрахунку високої постійної напруги в резонансних системах заряджання ємності ізоляції високовольтних кабелів.

Застосування резонансних систем зі стабілізованим вихідним струмом в зарядних пристроях ЄНЕ не є новим [7, 8]. У цих роботах обґрунтовано використання високовольтних трансформаторів для отримання високої напруги на ЄНЕ. Тобто високовольтні трансформатори, що узгоджують опір навантаження з опором резонансного кола, були невід'ємною частиною таких ЗП. Причини застосування високовольтних трансформаторів у резонансних ЗП обґрунтовано І.В. Пентеговим у [8] для забезпечення критерію мінімуму габаритів реактивних елементів резонансного кола, але автор не враховував додаткові габарити самих трансформаторів. Тобто високовольтні безтрансформаторні резонансні зарядні пристрої цими авторами не досліджувалися.

Розробка високовольтних безтрансформаторних зарядних пристроїв гальмується тим, що реактивна потужність у резонансному колі значно більша за активну потужність у колі навантаження. Іншими словами струм у резонансному колі, в яке входять транзисторні ключі, значно перевищує струм у колі навантаження. Це явище спостерігається як для випадку неперервного розкачування струму в резонансному колі [9], так і для генерації послідовних резонансних імпульсів [10]. Не має сенсу використовувати такі резонансні системи, якщо підвищення струму в колі інвертора вимагає підвищувати номінальні та максимально допустимі струмові характеристики силових елементів перетворювачів. Це може призвести до збільшення втрат енергії в елементах резонансного кола, знизити ККД зарядного пристрою та підвищити ціну пристрою в цілому.

Але такі висновки суперечать результатам попередніх досліджень високовольтного безтрансформаторного резонансного зарядного пристрою (ВВБРЗП) [5], які показали, що елементи резонансного кола експериментальних високовольтних резонансних зарядних пристроїв нагріваються значно менше за елементи трансформаторних зарядних пристроїв (ТЗП), в яких використовується масляне охолодження [4]. Отже, залишається відкритим питання порівняння струмів у колах інверторів високовольтних зарядних пристроїв ЄНЕ найбільш розповсюджених схем. Саме тому дослідження та порівняння характеристик резонансних систем для отримання високої напруги на навантаженні ємнісного типу є актуальною задачею.

**Мета роботи:** дослідити та порівняти струми в колах інверторів безтрансформаторних резонансних та трансформаторних систем для отримання високої напруги на навантаженні ємнісного типу для визначення типу системи, що характеризується найменшим середнім струмом ключів інвертора.

*Моделювання процесів заряджання ємнісного накопичувача енергії до напруги 70 кВ.*

Для отримання напруги порядку  $U_{out}=70$  кВ із застосуванням резонансного зарядного пристрою ЄНЕ із вхідною напругою  $E$  необхідно забезпечити високу добротність резонансного кола  $Q > U_{out}/E$  [9]. Таку умову можна задовольнити, забезпечивши задане відношення індуктивного  $\omega L$  та активного опору  $r$  резонансного кола, а саме,  $Q = \omega L/r$ . Через те, що власна частота резонансного кола, побудованого на нелінійному індуктивному елементі (дросель із осереддям), значно залежить від температури осереддя, у резонансних зарядних пристроях використовують повітряні дроселі. У такому випадку активний опір  $r$  резонансного кола практично дорівнює опору дроселя. У разі збільшення індуктивності повітряного дроселя зростає і його активний опір, що стає причиною теплових втрат енергії в резонансному колі, що знижує ККД резонансного зарядного пристрою. Таким чином, необмежене збільшення добротності резонансного кола є недоцільним. Тому для моделювання процесів у зарядному пристрої задано напругу на виході резонансного кола в межах 30 кВ. Для забезпечення вихідної напруги  $U_{out}=70$  кВ, необхідної для випробування електричної міцності ізоляції високовольтних кабелів, випрямляч побудовано за схемою збільшення напруги у три рази.

Для проведення порівняльного аналізу електричних характеристик резонансного кола з традиційними нерезонансними системами обрали три найбільш відомі схеми зарядних пристроїв ємнісних накопичувачів енергії, наведені на рис. 1. На рис. 1 *а* наведено схему зарядного пристрою ЭНЕ, позначеного на схемі  $C_p$ , з індуктивним струмообмеженням за допомогою дроселя  $L$  (ЗПС), на рис. 1 *б* – схему трансформаторного резонансного зарядного пристрою



(ТРЗП), в якому струмообмеження виконано за допомогою послідовного резонансного кола, на рис. 1 а – схему високовольтного безтрансформаторного резонансного зарядного пристрою. Резонансне коло на рис. 1 б, в утворюють індуктивність  $L$  та ємність  $C_r$ . Формувач постійної напруги (ФПН) на рис. 1 показано як джерело напруги  $E$ . У всіх схемах використовується проміжне перетворення частоти за допомогою напівмостового інвертора з транзисторними ключами  $S_1, S_2$  та конденсаторами  $C_1, C_2$ . Як генератор або джерело постійної напруги можна використовувати випрямляч мережевої напруги або акумулятор. Інвертор може мати мостову або напівмостову топологію. Високовольтний випрямляч може бути побудований за мостовою, одно- або двофазною схемою постійного струму або за схемою множення напруги.

Дослідження процесів в схемах ЗП проведено за допомогою імітаційного моделювання засобами LTSpice. На рис. 2 наведено модель в середовищі LTSpice для моделювання процесів у ЗПС (рис.2 б), ВВБТРЗП (рис.2 в), ТРЗП (рис.2 г) з єдиним джерелом живлення постійного струму  $E$  (рис.2 а). Параметри моделі ВВБТРЗП дорівнюють параметрам дроселя експериментального зразка ЗП.

Для порівняння струмів у колах інверторів зарядних пристроїв ємнісного накопичувача енергії параметри в трансформаторних схемах задано таким чином, що вони забезпечують однакову вихідну потужність.

$$P_{out} = \frac{W_{Cp}}{t_3} = \frac{C_p U_{Cp}^2}{2t_3}. \quad (1)$$

де  $W_{Cp}$  – енергія, накопичена в ЄНЕ,  $C_p$  – ємність ЄНЕ,  $U_{Cp}$  – напруга, до якої заряджений ЄНЕ,  $t_3$  - час заряджання ЄНЕ.

Параметри моделей ЗПС та ТРЗП підбрано так, щоб заряджання ЄНЕ до напруги 70 кВ здійснювалось за однаковий час. Тобто всі представлені моделі мають однакову вихідну потужність заряджання ЄНЕ до 70 кВ.

На рис. 2 а наведено модель джерела напруги, на виході якої формується постійна напруга 300 В (між вузлами hv та N, а також між N та землею). Конденсатори C32, C36 – C38 є частиною напівмостової схеми інверторів. На рис. 2 б, в, г наведено транзисторні частини інверторів із транзисторними ключами  $S$ .

Модель ЗПС на рис. 2 б містить транзисторні ключі інвертора  $S_2, S_3$ , паралельно до яких приєднано зворотні діоди. Модель трансформатора побудовано на магнітноз'єднаних індуктивностях  $L_2, L_3$ , коефіцієнт трансформації визначається за виразом  $k_{tr} = \sqrt{L_3/L_2}$ .

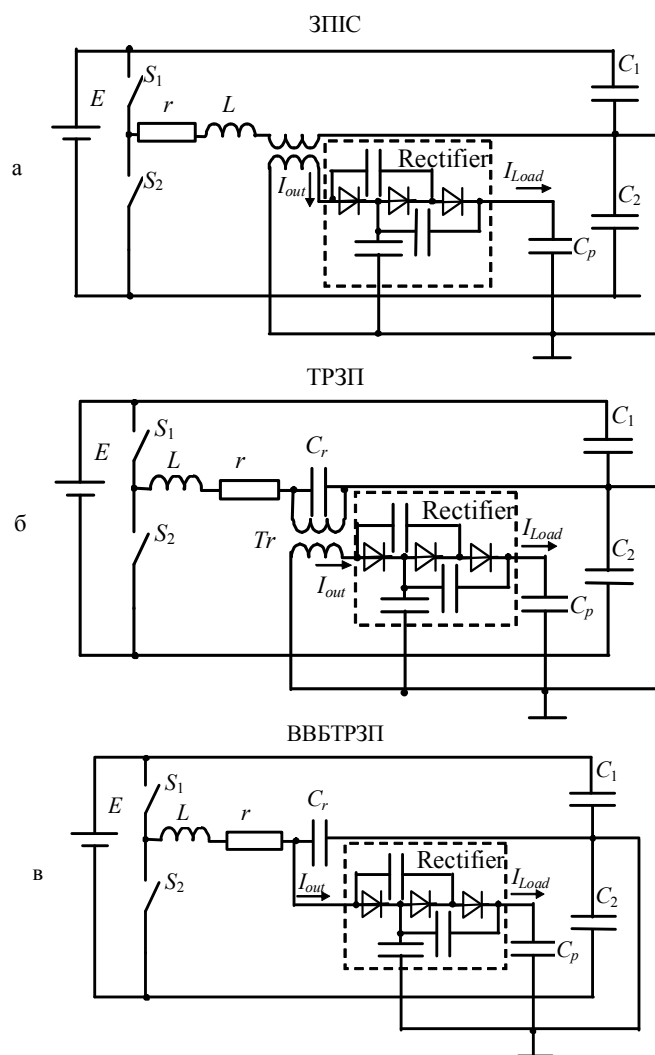


Рис. 1. Структурні схеми зарядних пристроїв ємнісних накопичувачів енергії

У моделі трансформатора його індуктивність розсіювання вказана як така, що дорівнює нулю. Реальна індуктивність розсіювання трансформатора підсумовується з індуктивністю зовнішнього дроселя і дорівнює індуктивності L4, яка обмежує струм транзисторів.

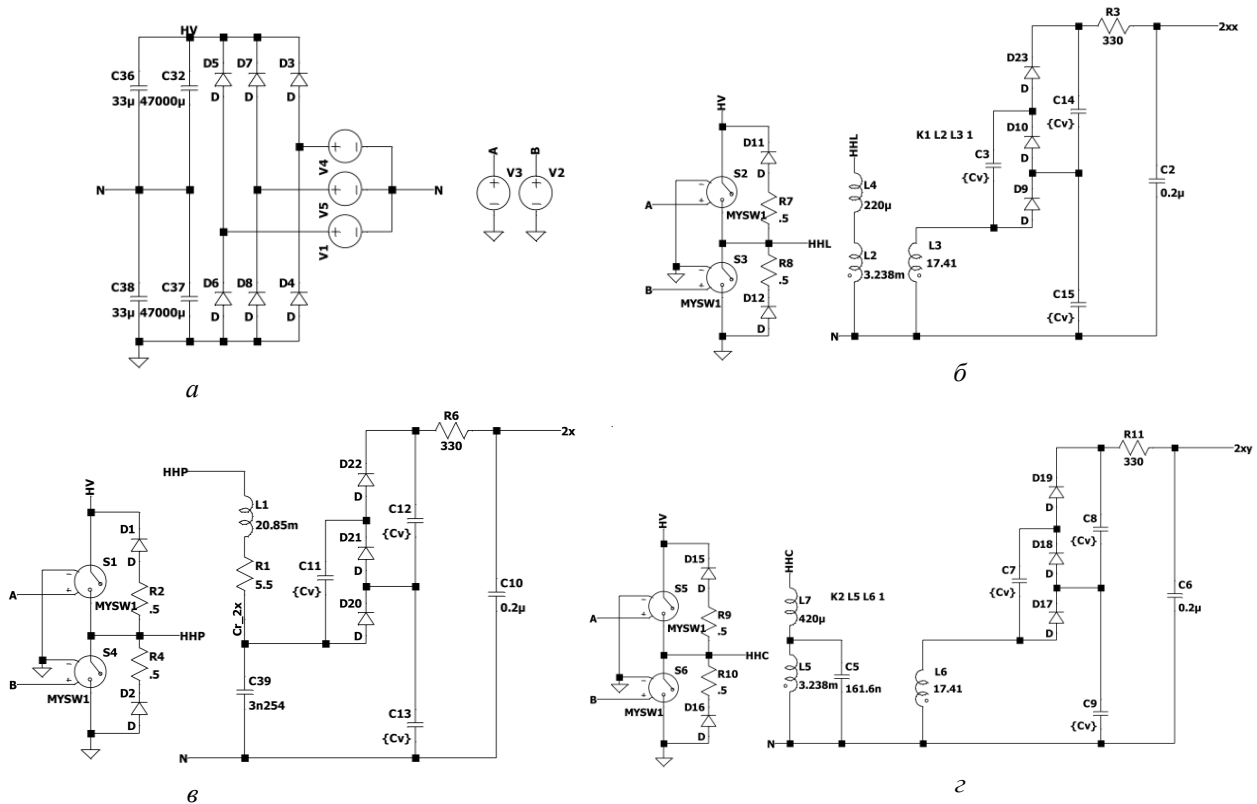


Рис. 2. Схеми для імітаційного моделювання в середовищі LTSpice процесів в ЗПІС (б), ВВБТРЗП (в), ТРЗП (з) з єдиним ФПН (а)

Модель помножувача напруги побудовано із діодів D9, D10, D23 та конденсаторів C3, C14, C15. Ємнісний накопичувач енергії на моделі представлено конденсатором C2, напруга на якому вимірюється між точками 2xx та N.

Модель ВВБТРЗП на рис. 2 в містить транзисторні ключі інвертора S1, S4, паралельно до яких приєднано зворотні діоди. Індуктивність L1 утворює резонансне коло з конденсатором C39. Активний опір котушки індуктивності представлено на моделі резистором R1. Модель помножувача напруги побудовано із діодів D20 – D22 та конденсаторів C11 – C13. Ємнісний накопичувач енергії на моделі представлено конденсатором C10, напруга на якому вимірюється між точками 2x та N. Модель ТРЗП на рис.2 з містить транзисторні ключі інвертора S5, S6, паралельно до яких приєднано зворотні діоди. Модель трансформатора побудовано на магнітноз’єднаних індуктивностях L5, L6, коефіцієнт трансформації визначається за виразом  $k_{tr} = \sqrt{L5/L6}$ .

У моделі трансформатора індуктивність його розсіювання вказана як така, що дорівнює нулю. Реальна індуктивність розсіювання трансформатора сумується з індуктивністю зовнішнього дроселя і дорівнює індуктивності L7, яка утворює резонансне коло з конденсатором C5. Модель помножувача напруги побудовано із діодів D17– D19 та конденсаторів C7– C9. Ємнісний накопичувач енергії на моделі представлено конденсатором C6, напруга на якому вимірюється між точками 2xy та N.

На рис. 3 наведено результати імітаційного моделювання – струми через транзистори інверторів ЗПІС (див. рис. 3 а), БТРЗП (див. рис. 3 б), ТРЗП (див. рис. 3 в) та напруга на ЄНЕ (див. рис. 3 з). Середній струм заряду ЄНЕ для всіх схем (див. рис. 2 б, в, з) однаковий, що впливає із залежності середнього зарядного струму  $I_z$  від ємності  $C_p$  ЄНЕ, напруги на ньому

$U_{Cp}$  й часу зарядки  $t_3$ :  $I_3 = C_p U_{Cp} / t_3$  та однакових значень всіх змінних у правій частині рівняння. Для схем із трансформатором із коефіцієнтом трансформації  $k_{tr}$  (ЗПС, ТРЗП) струм транзисторів інвертора визначається через струм вторинної обмотки трансформатора  $I_2$  за виразом  $I_1 = k_{tr} I_2$ .

Для ЗПС зарядний струм зменшується в процесі зарядки, а вимірний середній діючий струм транзисторів інвертора (або струм крізь струмообмежувальну індуктивність) (див. рис. 3 а) дорівнює  $I_L = 7,03$  А.

Його визначили за результатами імітаційного моделювання.

Для ТРЗП вимірний за результатами моделювання (див. рис. 3 б) середній діючий струм крізь транзистори інвертора або струм індуктивності резонансного кола, приведений до первинної обмотки трансформатора, дорівнює  $I_L = 7,85$  А. Для схеми ВВБТРЗП вимірний за результатами моделювання (див. рис. 3 в) середній діючий струм крізь транзистори інвертора та індуктивність резонансного кола дорівнює  $I_L = 4,16$  А, що в 1,9 раза менше за струм у схемі ТРЗП та в 1,7 раза менше за струм у схемі з індуктивним струмообмеженням.

Результати моделювання показують, що струм у колі інвертора за використання безтрансформаторної резонансної схеми майже в два рази менший порівняно з іншими наведеними трансформаторними схемами. Це підтверджують результати попередніх досліджень, у яких транзистори інвертора ВВБТРЗП нагріваються значно менше за транзистори інвертора в трансформаторних схемах.

*Залежності струмів в колах інверторів від параметрів їхніх елементів.*

Для отримання залежностей струмів у колах досліджуваних схем від їхніх параметрів використовували спрощену модель зарядного пристрою, наведену в [9]. У моделі напругу  $U_{Cr}$ , що встановилася на конденсаторі резонансного кола  $C_r$ , можна задати як падіння напруги на активному опорі  $R$ , якій розраховується за виразом  $R = U_{Cr} / I$ . Слід відмітити, що потужність  $p_{Cp} = u_{Cp} i$  зарядки ЄНЕ  $C_p$  має активний характер, тому що добуток напруги на ЄНЕ  $u_{Cp}$  та струму  $i$  в колі навантаження з опором  $R$  завжди позитивний. Через спрощення схеми, замінивши послідовно з'єднані випрямляч та ємнісний накопичувач  $C_p$  на активний опір  $R$ , отримано більш просту модель, яка дає змогу одержати зручні для аналізу залежності характеристик високовольтного безтрансформаторного резонансного зарядного пристрою ємнісного накопичувача від його параметрів та добротності резонансного кола. У цій моделі відносний безрозмірний активний опір навантаження визначається виразом  $k = \frac{R}{\omega L}$ , де добротність резонан-

$$Q = \frac{\omega L}{r} = \frac{1}{\omega C_p r}.$$

Наведена модель побудована для схеми випрямляча, яка не передбачає множення напруги. У випадку використання помножувача напруги як вихідна напруга за моделлю розраховується максимальна напруга на ємності резонансного кола  $U_{Crm}$ . Напруга на ЄНЕ складає

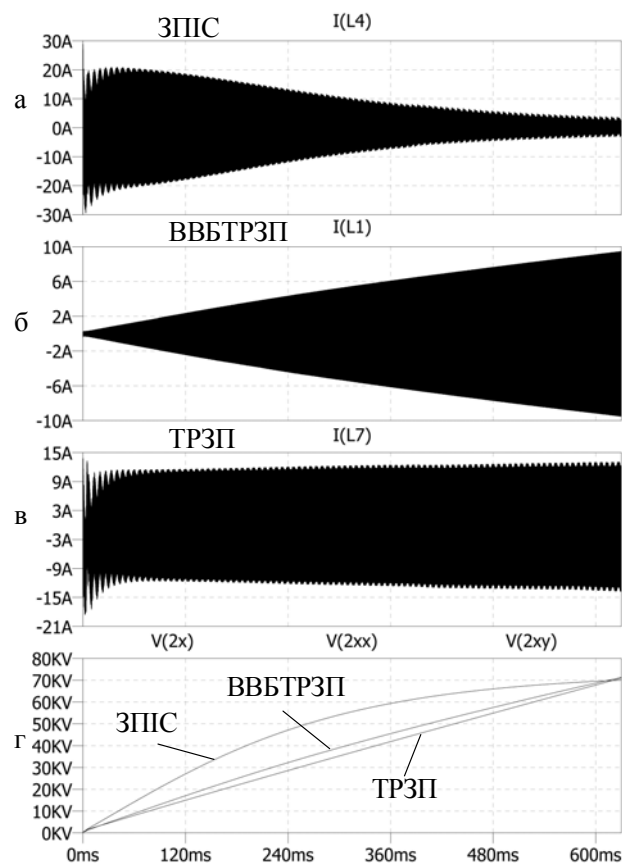


Рис. 3. Результати імітаційного моделювання – струми транзистори інверторів ЗПС (а), ТРЗП (б), ВВБТРЗП (в) та напруги на ЄНЕ (г)

$U_{Cp}=3U_{Crm}$ . У разі використання помножувача напруги вихідним струмом, що розраховується за моделлю, є струм  $I_{out}$ , який йде на вхід випрямляча (див. рис.1). Зарядний струм дорівнює  $I_{Load}=I_{out}/3$ . Відповідно для помножувача напруги опір навантаження визначається як  $R=U_{Crm}/I_{out}$ . Наведена в [9] модель є спрощеною, але вона дає змогу оцінити залежність струмів у зарядному пристрої від добротності резонансного кола та напруги на навантаженні, що дорівнює  $U_{Crm}$  та пов'язана зі значенням відносного безрозмірного опору навантаження  $k$  виразом, наведеним в [9]  $k = \frac{Q \cdot |U_{Crm}|}{QE - |U_{Crm}|}$ , де  $U_{Crm}$  – максимальна напруга на ємності резонансного

кола, яка втричі менша напруги на ЄНЕ, що зумовлено використанням помножувача напруги на 3. Для моделі ТРЗП з урахуванням коефіцієнта трансформації  $k_{tr}$ , відносний безрозмірний активний опір, приведений до первинної обмотки трансформатора, дорівнює  $k' = \frac{R}{\omega L k_{tr}^2} = \frac{k}{k_{tr}^2}$ .

Згідно з виразом [9]  $I_L = \frac{Q \cdot E \cdot (jk + 1)}{j\omega L \cdot (k + Q - j)}$  модуль струму в резонансному колі моделі ТРЗП дорівнює

$$I_1 = I_L = \frac{Q \cdot E \cdot \sqrt{k^2 + 1}}{\omega L \cdot \sqrt{(k+Q)^2 + 1}} = \frac{Q \cdot I_{CS} \cdot \sqrt{k^2 + 1}}{\sqrt{(k+Q)^2 + 1}}, \quad (2)$$

де  $I_{CS}=E/\omega L$  – струм індуктивності резонансного кола та транзисторів інвертора в разі короткого замикання навантаження, тобто коли опір навантаження дорівнює нулю в момент початку зарядки конденсаторів випрямляча та ЄНЕ.

Із урахуванням умови  $Q \gg 1$  цей вираз перетворюється у вираз  $I_1 = I_{CS} \cdot \sqrt{k^2 + 1}$ . За умови короткого замикання ( $U_{Cp}=0, R=0, k'=0$ )  $I_1 = I_{CS}$ .

Коли напруга на ЄНЕ досягне заданого значення (70 кВ у моделюванні), напруга на первинній обмотці трансформатора досягне напруги  $E_m$ , що відповідає значенню відносного навантаження  $k'=1$ . Відповідно до виразу (2) струм індуктивності резонансного кола та транзисторних ключів досягне значення  $\sqrt{2}I_{CS}$ . Тобто в моделі ТРЗП середній діючий струм індуктивності  $L$  буде визначатись площею криволінійної трапеції (див. рис. 3 в), паралельні бокові грані якої дорівнюють  $I_{CS}$  та  $\sqrt{2}I_{CS}$ . У процесі зарядки ЄНЕ  $k'$  буде змінюватись у діапазоні від 0 до 1, а струм у колі інвертора буде змінюватись незначно. Виміряний за результатами моделювання середній діючий струм індуктивності резонансного кола дорівнює  $I_1 = 7,85$  А.

Для моделі ВВБТРЗП із виразу (2) слідує, що модуль струму індуктивності резонансного кола за умови короткого замикання ( $U_{Cp}=0, R=0, k=0$ ) дорівнює  $I_{CS}$ , а наприкінці зарядки дорівнює

$$I_1 = I_L = \frac{Q \cdot I_{CS} \cdot \sqrt{k^2 + 1}}{\sqrt{(k+Q)^2 + 1}}, \quad (3)$$

Слід враховувати, що напруга на конденсаторі резонансного кола в моделі ВВБТРЗП в  $k_{tr}$  разів більша за напругу на конденсаторі резонансного кола в моделі ТРЗП. Це пояснюється тим, що в усіх моделях ЄНЕ заряджається до однакової напруги. Відповідно струм короткого замикання  $I_{CS}$  у моделі ВВБТРЗП у  $k_{tr}$  разів менше за струм у моделі ТРЗП. Введемо позначення  $I_{CSi}$  і  $I_{CSil}$  відповідно для трансформаторної та безтрансформаторної схем. Тоді  $I_{CSi}=k_{tr}I_{CSil}$ .

Зростання струму за виразом (3) пояснюється послідовним введенням енергії в резонансний контур. Водночас, огинаючи епюр струму індуктивності резонансного кола і напруги на конденсаторі резонансного кола є подібними. Тому можна вважати, що в моделі ВВБТРЗП наприкінці зарядки ЄНЕ до заданої напруги за виразом (1) струм за виразом (3) незначно відрізняється від струму індуктивності резонансного кола в моделі ТРЗП. Тобто коефіцієнт при  $I_{CS}$  у виразі (3) приблизно дорівнює  $k_{tr}$ .

Наприкінці зарядки струм у колі інвертора ВВБТРЗП  $I_1$  згідно з виразом (3) буде значно більше струму на початку зарядки  $I_{CSil}$ . Отже, будемо вважати, що для моделі ВВБТРЗП огинаюча епюри цього струму має форму трикутника (див. рис. 3 б). Отже, середній діючий

струм в колі інвертора буде визначатись площею цього трикутника. Завдяки тому, що площа трикутника майже вдвічі менша за площу трапеції для моделі ТРЗП з практично рівними паралельними гранями, то і струм у колі інвертора для схеми ВВБТРЗП буде меншим, ніж у схемі ТРЗП. Цей висновок підтверджено результатами імітаційного моделювання.

Отримані залежності струмів у колах інверторів від параметрів резонансних кіл довели, що застосування безтрансформаторної схеми для забезпечення однакової потужності ЗП ЄНЕ дасть змогу майже удвічі знизити номінальні та максимально допустимі струмові характеристики силових елементів перетворювачів. Це зумовлено майже лінійною залежністю зростання діючого значення струму в резонансному колі від часу зарядки ЄНЕ. Таким чином, використання безтрансформаторної схеми майже удвічі знизить номінальні та максимально допустимі струмові характеристики силових елементів перетворювачів у резонансних зарядних пристроях однакової потужності.

**Висновки.** Проведені дослідження та порівняння струмів у колах інверторів безтрансформаторних резонансних та трансформаторних резонансних і нерезонансних систем для отримання високої напруги на навантаженні ємнісного типу дало змогу визначити тип системи, що характеризується найменшим середнім діючим струмом ключів інвертора. Отримані залежності струмів у колах інверторів від параметрів резонансних кіл та результати розрахунків за ними дають підставу стверджувати, що застосування безтрансформаторної схеми для забезпечення однакової потужності систем для отримання високої напруги на навантаженні ємнісного типу майже вдвічі знизять середній діючий струм у колі інвертора. Теоретичні результати підтверджено результатами імітаційного моделювання. Використання високовольтних безтрансформаторних резонансних систем для отримання високої напруги на навантаженні ємнісного типу майже вдвічі знизять номінальні та максимально допустимі струмові характеристики силових елементів перетворювачів.

*Роботу виконано за Проектом № 2022.01/0211 "Розробка мобільної системи формування напруги зі змінними параметрами для моніторингу безпеки і надійності високовольтного електрообладнання енергетичних об'єктів критичної інфраструктури України", який фінансується Національним фондом досліджень України.*

1. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів. 2018. Харків: Індустрія, 320 с.
2. Boguslavsky L.Z., Sinchuk A.V., Nazarova N.S., Adamchuk Y.O., Chuschak S.V. Creation of nanostructural carbide coatings on material surfaces using products of refractory wire electroexplosion. *Journal of Physical Studies*. 2020. Vol. 24. No.3. Pp. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.30970/jps.24.3501>
3. Malyushevskaya A., Koszelnik P., Yushchishina A., Mitryasova O., Mats A., Gruca-Rokosz R. Eco-friendly principles on the extraction of humic acids intensification from biosubstrates. *Journal of Ecological Engineering*. 2023. Vol. 24. No.2. Pp. 317–327. DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993/156867>
4. Вовченко А.И., Богуславский Л.З., Мирошниченко Л.Н. Тенденции развития мощных высоковольтных генераторов импульсных токов в ИИПТ НАН Украины. *Технічна електродинаміка*. 2010. № 5. С. 69–74.
5. Vinnychenko D., Nazarova N., Vinnychenko I. Transformerless high-voltage resonant charging systems for capacitive energy storage devices for electro-discharge technologies. *Proc. of IEEE 41st International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO 2022)*. 2022. Pp. 727–731. DOI: <https://doi.org/10.1109/ELNANO54667.2022.9927052>
6. Супруновская Н., Щерба А. Процессы перераспределения электрической энергии между параллельно соединенными конденсаторами. *Технічна електродинаміка*. 2015. № 4. С. 3–11.
7. Милях А.Н., Волков И.В. Системы неизменного тока на основе индуктивно-емкостных преобразователей. 1974. К.: Наукова Думка. 216 с.
8. Пентегов И.В. Основы теории зарядных цепей емкостных накопителей энергии. 1982. Киев: Наукова думка. 422 с.
9. Vinnychenko D.V., Nazarova N.S., Vinnychenko I.L. Research of characteristics of high voltage transformerless resonant charger of capacitary storage device. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2023. No. 2. Pp. 21–25. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2023.02.021>
10. Pavlov G., Vinnichenko I., Pokrovskiy M. Research of the interrelationship between the frequency converter on the basis of the resonant inverter with nonlinear control power unit parameters and its load. *2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*. 2017. Pp. 554–559. DOI: <https://doi.org/10.1109/UKRCON.2017.8100300>



**CHARACTERISTICS OF RESONANT SYSTEMS FOR OBTAINING HIGH VOLTAGE ON A CAPACITIVE LOAD****D.V. Vinnychenko**

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,  
Beresteisky ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine,  
e-mail: [vdvvs@gmail.com](mailto:vdvvs@gmail.com)

*The work is devoted to the comparative analysis of currents in inverter circuits of transformerless resonant and transformer resonant and non-resonant systems of the same power for obtaining high voltage on a capacitive load. The purpose of the work is to determine the type of system characterized by the smallest average operating current of the inverter switches. The dependence of the currents in the circuits of the inverters on the parameters of the resonant circuits was obtained, the results of calculations according to which allow us to state that the use of a transformerless circuit to ensure the same power of systems for obtaining high voltage on a capacitive type load will allow to almost halve the average operating current in the inverter circuit. Simulation modeling of the processes in the studied schemes was carried out, which confirms the obtained theoretical results. The use of high-voltage transformerless resonant systems to obtain high voltage on a capacitive load will allow to halve the nominal and maximum permissible current characteristics of the power elements of the converters. Ref. 10, fig. 3.*

**Key words:** electrotechnical system, alternating current, inductive-capacitive circuit, series resonance, transformerless charger, resonant circuit Q factor.

1. Rules for the technical operation of consumers' electrical installations. 2018. Kharkiv: Industry, 320 p. (Ukr)
2. Boguslavsky L.Z., Sinchuk A.V., Nazarova N.S., Adamchuk Y.O., Chuschak S.V. Creation of nanostructural carbide coatings on material surfaces using products of refractory wire electroexplosion. *Journal of Physical Studies*. 2020. Vol. 24. No. 3. Pp. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.30970/jps.24.3501>
3. Malyushevskaya A., Koszelnik P., Yushchishina A., Mitryasova O., Mats A., Gruca-Rokosz R. Eco-friendly principles on the extraction of humic acids intensification from biosubstrates. *Journal of Ecological Engineering*. 2023. Vol. 24. No. 2. Pp. 317–327. DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993/156867>
4. Vovchenko A.I., Boguslavsky L.Z., Miroshnichenko L.N. Trends in the development of powerful high-voltage pulsed current generators at the Institute of Power Engineering of the National Academy of Sciences of Ukraine. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2010. No. 5. Pp. 69–74. (Rus)
5. Vinnychenko D., Nazarova N., Vinnychenko I. Transformerless high-voltage resonant charging systems for capacitive energy storage devices for electro-discharge technologies. *Proc. of IEEE 41st International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO 2022)*. 2022. Pp. 727–731. DOI: <https://doi.org/10.1109/ELNANO54667.2022.9927052>
6. Suprunovskaya N., Shcherba A. Processes of redistribution of electrical energy between parallel-connected capacitors. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2015. No. 4. Pp. 3–11 (Rus)
7. Milyakh A.N., Volkov I.V. Constant current systems based on inductive-capacitive converters. 1974. K.: Naukova Dumka. 216 p. (Rus)
8. Pentegov I.V. Fundamentals of the theory of charging circuits of capacitive energy storage devices. 1982. Kyiv: Naukova Dumka. 422 p. (Rus)
9. Vinnychenko D.V., Nazarova N.S, Vinnychenko I.L. Research of characteristics of high voltage transformerless resonant charger of capacitary storage device. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2023. No. 2. Pp. 21–25. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2023.02.021>
10. Pavlov G., Vinnichenko I., Pokrovskiy M. Research of the interrelationship between the frequency converter on the basis of the resonant inverter with nonlinear control power unit parameters and its load. *2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*. 2017. Pp. 554–559. DOI: <https://doi.org/10.1109/UKRCON.2017.8100300>

Надійшла: 17.06.2024  
Прийнята: 23.08.2024

Submitted: 17.06.2024  
Accepted: 23.08.2024

УДК 621.314

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2024.68.095>**ТИРИСТОРНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ЗІ ШТУЧНОЮ КОМУТАЦІЄЮ**

**В.В. Голубєв** \*, канд. техн. наук, **В.М. Губаревич** \*\*, канд. техн. наук,  
**В.І. Зозульов** \*\*\*, канд. техн. наук, **Ю.В. Маруня** \*\*\*\*, канд. техн. наук, **А.І. Сторожук**  
Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна  
e-mail: [marunia@ied.org.ua](mailto:marunia@ied.org.ua)

*У роботі представлено перспективні схеми тиристорних трансформаторних і безтрансформаторних перетворювачів змінної та постійної напруги зі штучною модернізованою комутацією та наведено докладний опис роботи останньої. Бібл. 2, рис. 7.*

**Ключові слова:** перетворювачі, вузли комутації, тиристори, трансформатори, якість вихідної енергії.

Тиристорні перетворювачі (ТП) змінної напруги однофазні і трифазні будуються на основі тиристорів із природною або штучною комутацією [1, 2]. Їхня загальна перевага – висока надійність унаслідок великої перевантажувальної здатності та великого коефіцієнта посилення ланцюга керування тиристором, що знижує втрати на керування. ТП можуть бути побудовані з урахуванням великих і надвеликих потужностей.

Загальними особливостями ТП є проблеми комутації тиристорів. ТП із природною комутацією (ПК) можуть працювати тільки в режимі фазового і низькочастотного (нижче частоти мережі) керування. До того ж, у разі фазового глибокого керування виникає відставання струму навантаження (мережі) від напруги мережі за активного й активно-індуктивного навантаження, що спричиняє низький вхідний коефіцієнт потужності перетворювача. У разі роботи на активно-індуктивне навантаження вони мають зону нечутливості до керування, рівну куту зсуву фази. ТП-ПК не вимагають систем скидання накопиченої в схемі енергії, застосовуються для регулювання напруги в печах нагріву і в асинхронному параметричному електроприводі, для побудови пускачів і перетворювачів частоти (циклоконверторів) в асинхронному частотному електроприводі, у резонансних інверторах для високочастотного нагріву металів та ін.

ТП зі штучною комутацією (ШК) і високочастотним широтно-імпульсним керуванням позбавлені зазначених недоліків. Однак схеми, розроблені та досліджені раніше [1, 2], мають властивість накопичення енергії у вузлах комутації (ВК) під час роботи на високій частоті, що вимагає розробки нових методів побудови ВК і способів управління ними.

Ураховуючи вищезазначене, **метою роботи** є визначення нових схемотехнічних рішень та принципів побудови тиристорних перетворювачів змінної та постійної напруги різного функціонального призначення на основі мостових ключів з удосконаленими вузлами штучної комутації та їхньої роботи за результатами дослідження останніх на комп'ютерних моделях.

**Мостові ключі** за великої кількості ланцюгів, що перемикаються, мають можливість знизити масу, габарити і вартість перетворювачів побудовою схем із загальним вузлом ШК для всіх ланцюгів. Крім того, ТП-ШК порівняно з ТП-ПК мають істотно більшу швидкодію перемикання, більш високий вхідний коефіцієнт потужності, а також широкі функціональні можливості [1, 2]. У відомих і нових схемах ТП-ШК, описаних нижче, застосовані удосконалені ВК, новизна яких полягає в застосуванні двох додаткових зарядних (блокуючих) тиристорів. Останні дають змогу за високочастотної комутації контролювати й усувати зайві накопичення зарядів у комутуючих конденсаторах і дроселях, підвищуючи водночас надійність та економічність роботи ВК. ТП-ШК доцільно застосовувати для побудови *швидкодійних* регуляторів-стабілізаторів і перемикачів змінної напруги в системах гарантованого (резервованого) і безперебійного електропостачання, в асинхронному (параметричному і частотному)



електроприводі та системах симетрування струмів і напруг у трифазних електричних мережах.

На рис. 1 наведено схему регулятора змінної напруги із загальним вузлом ШК, що дає змогу перемикаати навантаження з одного виведення трансформатора на інший, число ланцюгів, що перемикаються за такої умови нічим не обмежене.

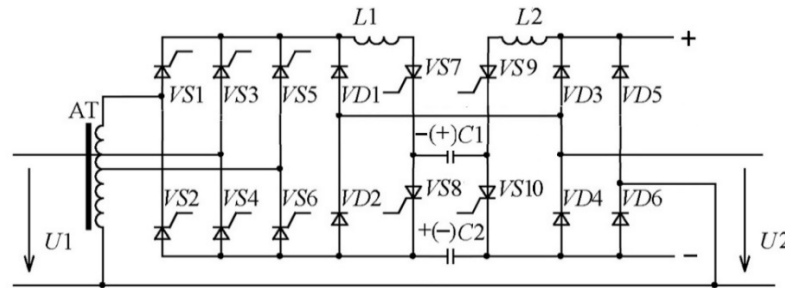


Рис. 1. Регулятор змінної напруги із загальним вузлом штучної комутації (ШК)

Перетворювач містить мережевий автотрансформатор АТ, вхідний тиристорно-діодний багатофазний міст ( $VS1-VS6$ ,  $VD1$ ,  $VD2$ ), вихідний діодний міст ( $VD3-VD6$ ), зарядні (блокуючі)  $VS7$ ,  $VS9$ , силовий (робочий)  $VS8$  і комутуючий  $VS10$  тиристири, комутуючі конденсатори ( $C1$ ,  $C2$ ) і комутуючі дроселі ( $L1$ ,  $L2$ ).

Для наочності опису процесів, що відбуваються в схемі, на рис. 2 наведено діаграми сигналів управління тиристорами вузла комутації, струмів у тиристорних ключах і напруг на комутуючих конденсаторах.

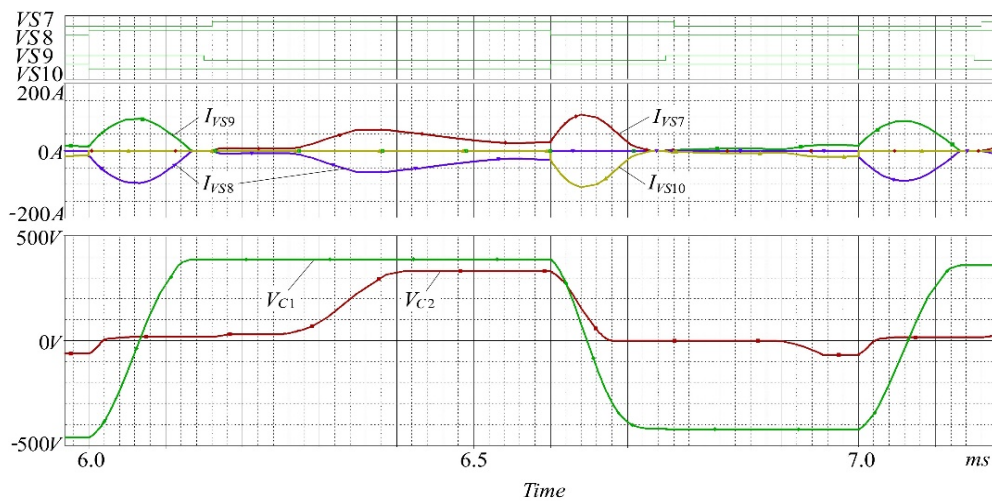


Рис. 2. Діаграми сигналів управління тиристорами  $VS7-VS10$ , струмів  $I_{VS7}-I_{VS7}$  у тиристорних ключах  $VS7-VS10$  і напруг  $V_{C1}$ ,  $V_{C2}$  на комутуючих конденсаторах  $C1$ ,  $C2$

Перетворювач працює таким чином. **На першому** (умовно), зарядному інтервалі часу, вмикаються робочий тиристор  $VS8$  і зарядний тиристор  $VS9$ . Комутуючі конденсатори  $C1$  і  $C2$  перезаряджаються через навантаження ланцюгом  $VD3-L2-VS9-C1-VS8-C2-VD6$  до полярності, зазначеної на лівих обклашках конденсаторів поза дужками. Унаслідок резонансного перезаряду  $C1$  (конденсатор  $C2$  залишається розрядженим) запираються тиристири  $VS8$  і  $VS9$ , а вузол комутації готовий до вимикання робочого тиристора  $VS8$  на початку третього інтервалу.

**На другому**, робочому інтервалі часу, керування подається на одну із трьох пар тиристорів вхідного мосту, наприклад  $VS1$  і  $VS2$ , а також  $VS7$  і  $VS8$ . Припустимо, що для тиристора  $VS1$  напруга мережі позитивна. Тоді струм буде проходити ланцюгом  $VS1-L1-VS7-VS8-VD2$ -навантаження-нуль мережі. У напрузі навантаження  $U2$  формується імпульс, рівний за величиною напрузі мережі. На другому інтервалі заряджається конденсатор  $C2$  (рис. 2).

На третьому інтервалі включається комутуючий тиристор  $VS10$ , зворотна напруга конденсаторів  $C1$  і  $C2$  вмикає робочий тиристор  $VS8$ , перезаряджається конденсатор  $C1$  ланцюгом  $VS1-L1-VS7-C1-VS10-VD6$ , розряджається конденсатор  $C2$  ланцюгом  $VD2-VD3-L2-VS9-VS10$ .

На четвертому інтервалі включається тиристор  $VS9$ , який спільно із включеним  $VS10$  і вихідним діодним мостом  $VD3-VD6$  утворює закоротку для реактивного струму навантаження й нульову паузу в останній.

Наприкінці паузи процес повторюється. Від того, яка пара вхідних тиристорів вмикається і на який час, залежить форма та величина основної гармоніки вихідної напруги, а також спосіб регулювання: вузько- або широкодіапазонний. Описана схема може використовуватися як джерело змінного та постійного струму.

У випадку побудови вузькодіапазонного регулятора-стабілізатора із метою підвищення якості вхідного струму й вихідної напруги перетворювача використовують вольтододаткові трансформатори (ВДТ) із однією або декількома первинними обмотками. В останньому випадку схема набуває більшої кількості ступенів (рівнів) регулювання, що дає змогу підвищити точність і якість регулювання вихідної напруги, особливо за наявності двох трансформаторів. Приклад такої схеми показано на рис.3, де застосування загального вузла комутації дає змогу здійснювати швидкодіюче (період мережі та вище) регулювання напруги із кількістю станів (рівнів вихідної напруги), що перевищує кількість пар силових тиристорів, замикання накоротко первинної обмотки ВДТ у період нульової паузи задля уникнення *дросельного ефекту*, що призводить до додаткових спотворень вихідної напруги.

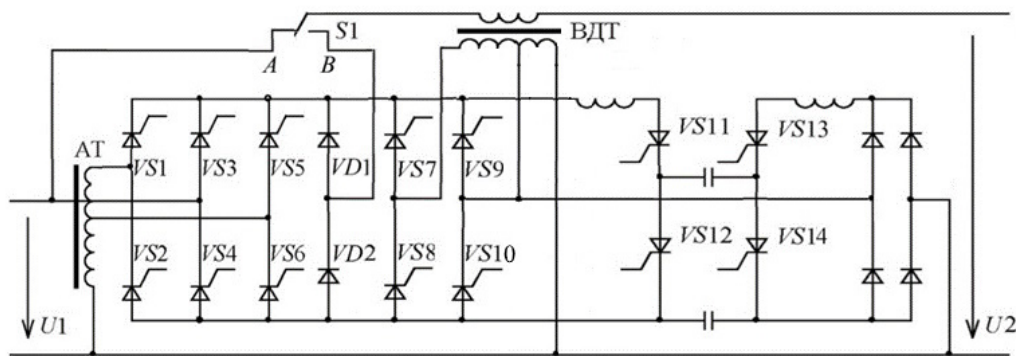


Рис. 3. Вузькодіапазонний регулятор-стабілізатор з вольтододатковим трансформатором

Перетворювач за схемою, зображеною на рис. 3, має два режими роботи  $A$  і  $B$ , які попередньо встановлюються ключем  $S1$ . У режимі  $A$  напруга вторинної обмотки ВДТ підсумовується з нерегульованою напругою мережі, тобто здійснюється вузькодіапазонне регулювання вихідної напруги. У режимі  $B$  здійснюється широкодіапазонне регулювання завдяки широтно-імпульсному регулюванню (ШІР) напруги мережі та ШІР ВДТ. Кількість можливих станів схеми в обох режимах незмінна й дорівнює семи (з урахуванням нульового).

Загальний вузол комутації може бути використаний у перетворювачах різного функціонального призначення. Так, на рис. 4 наведена схема, за якою можна будувати перетворювачі частоти, пристрої, що симетрують, пристрої для підключення однофазних навантажень до трифазної електричної мережі, а на рис. 5 – швидкодіючі перемикачі резервних мереж для агрегатів безперебійного живлення.

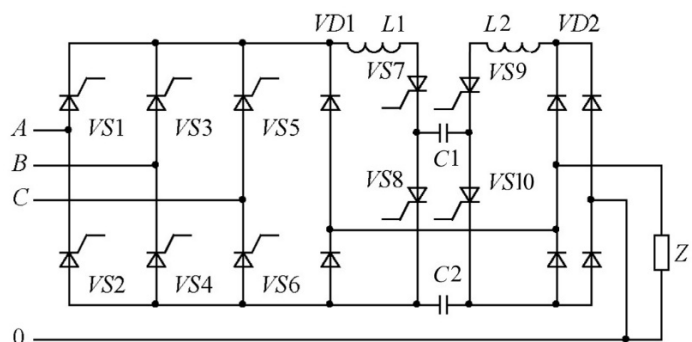
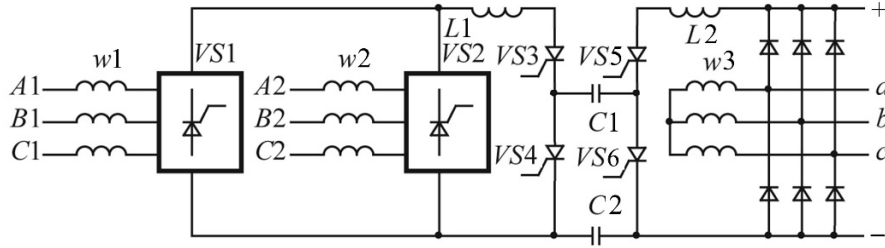
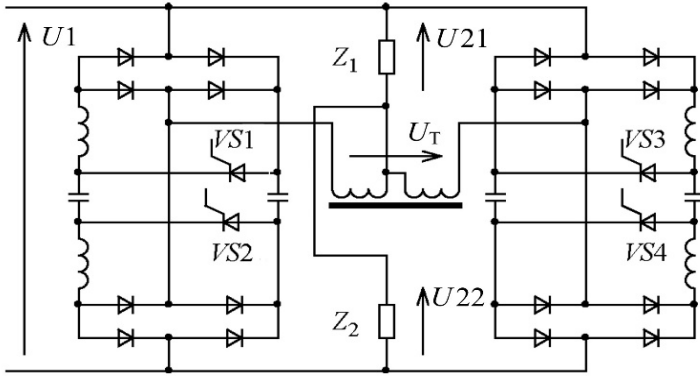


Рис. 4. Тиристорний перетворювач із загальним вузлом комутації



**Рис. 5.** Швидкодіючий перемикач резервних мереж для агрегатів безперебійного живлення на основі тиристорного перетворювача із загальним вузлом комутації

Найбільш поширеними структурами перетворювачів є ті, які дають змогу змінювати рівень вихідної напруги в широкому діапазоні вгору і вниз від номінального з високою точністю і малими спотвореннями. Такі системи, як показано на прикладі рис. 3, вимагають застосування трансформаторів, що можуть поєднувати в одному пристрої і широке, і вузькодіапазонне регулювання. Трансформатори працюють як на основній, так і на підвищених частотах. У разі використання трансформаторів на підвищеній частоті знижуються маса й габарити пристроїв, але збільшується кількість напівпровідникових елементів для подвійного перетворення енергії та відповідно зростають втрати енергії й вартість перетворювача [1].

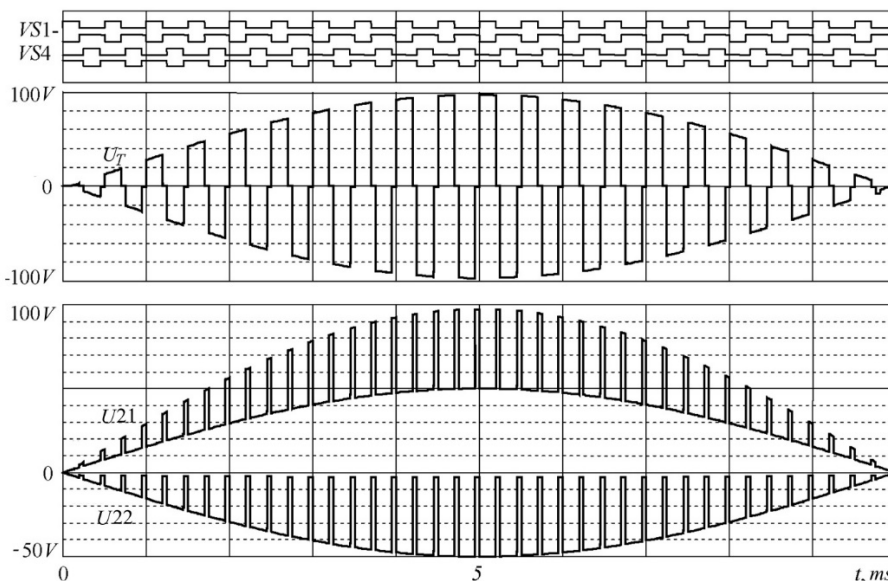


**Рис. 6.** Однофазний тиристорний перетворювач з автотрансформатором

На рис. 6 показана спрощена схема однофазного перетворювача, здатного мінімізувати вказаний недолік шляхом об'єднання в одному блоці функцій модулятора (інвертора) і демодулятора. Перетворювач за схемою рис. 5 містить чотири мостових діодно-тиристорних ключа  $VS1-VS4$  змінного струму із комутуючими дроселями й конденсаторами, а також автотрансформатор, що працює на підвищеній частоті. Навантаження  $Z1$  і  $Z2$  підключені до середньої точки обмотки автотрансформатора та до різних затискачів живлення для ілюстрації

можливостей перетворювача. У [1] запропоновані варіанти описаної схеми, що розширюють функції перетворювачів, побудованих на їхній основі з метою підвищення якості вихідної енергії.

На рис. 7 показані діаграми напруг на крайніх затискачах автотрансформатора  $U_T$  і на навантаженнях  $U21$  і  $U22$  за живлення перетворювача напругою змінного струму ( $U1 = 100$  В). Як видно з



**Рис. 7.** Діаграми сигналів управління тиристорами  $VS1-VS4$ , напруг на крайніх затискачах автотрансформатора  $U_T$  і на навантаженнях  $U21$  і  $U22$



діаграм, вихідну напругу можна регулювати як частотно-імпульсним, так і широтно-імпульсним способами у двох взаємнозонах, що доповнюють в діапазоні напруг  $U_{21} = (0,5-1)U_1$  і  $U_{22} = (0-0,5)U_1$ . У першому випадку отримуємо вузькодіапазонне регулювання, а в другому – глибоке в діапазоні  $(0-0,5)U_1$  та гіршу вдвічі якість вихідної напруги.

Слід зазначити, що перетворювачі, розроблені в Інституті електродинаміки НАН України на основі цих схем, досліджені на PSpice-моделях, випробувані на дослідних і мало-серійних зразках.

**Висновки.** 1. Описані вище схеми і принципи побудови перетворювачів змінної і постійної напруги підтверджують широкі можливості успішного використання штучної комутації тиристорів у малій і великій електроенергетиці.

2. ТП-ШК доцільно застосовувати для побудови швидкодіючих регуляторів-стабілізаторів і перемикачів змінної напруги в системах гарантованого (резервованого) і безперебійного електропостачання, в асинхронному (параметричному і частотному) електроприводі і системах симетрування струмів і напруг в трифазних електричних мережах.

1. Голубев В.В. Импульсное преобразование переменного напряжения. Наукова думка. Киев, 2014. 248 с.
2. Шидловський А.К., Новський В.О., Жаркін А.Ф. Стабілізація параметрів електричної енергії в трифазних системах напівпровідниковими коригуючими пристроями. Київ, Інститут електродинаміки НАН України. 2013. 378 с.

#### THYRISTOR CONVERTERS WITH ARTIFICIAL SWITCHING

**V.V. Golubev, V.M. Gubarevich, V.I. Zozulev, Yu.V. Marunya, A.I. Storozhuk**

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,  
Beresteyskiy ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine  
e-mail: marunia@ied.org.ua

*Promising schemes of thyristor converters of alternating and direct voltage with artificial switching are presented. Detailed descriptions of the operation of artificial switching units in transformer and transformer-free, single-phase and three-phase circuits of various functional purposes, comparison of their operational characteristics with circuits with natural switching and multi-zone pulse modulation are given. Ref. 2, fig. 7.*

**Key words:** converters, switching units, thyristors, transformers, output energy quality.

1. Golubev V.V. Pulse conversion of alternating voltage. Scientific thought. Kyiv, 2014. 248 p. (Rus)
2. Shidlovsky A.K., Novsky V.A., Zharkin A.F. Stabilization of electric energy parameters in three-phase systems with semi-conductor correction devices. Kiev, Institute of electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine. 2013. 378 p.

Надійшла: 03.08.2024

Прийнята: 27.08.2024

Submitted: 03.08.2024

Accepted: 27.08.2024

## СКЛАДОВІ ПОТУЖНОСТІ ТИРИСТОРНОГО РЕГУЛЯТОРА НАПРУГИ З АКТИВНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ

Є.І. Федів\*, канд. техн. наук, О.М. Сівакова\*\*, канд. техн. наук

Національний університет «Львівська політехніка»,

вул. Ст. Бандери, 12, Львів, 79012, Україна

e-mail: [yevhen.i.fediv@lpnu.ua](mailto:yevhen.i.fediv@lpnu.ua)

*Проведено дослідження балансу потужності напівпровідникового регулятора напруги на активному навантаженні фазовим керуванням двоопераційними тиристорами. Підтверджено придатність його використання для одночасного отримання ресурсу реактивної потужності для розподільних електричних мереж. Відповідно до концепції інтелектуальних електричних мереж такі пристрої відносять до класу гнучких систем пересилання змінного струму, вони також можуть бути основою для побудови віртуальних джерел енергії. Досліджено складові потужності для окремих компонент регулятора, включно з тиристорним блоком. Застосовано спектральний метод опису струмів і напруг на ділянках регулятора. Отримані результати теоретичних досліджень підтверджено прикладом із чисельними розрахунками, які дали змогу уточнити фізичну суть енергетичних перетворень під час регулювання напруги. Бібл. 8, рис. 3.*

**Ключові слова:** регулятор напруги, двоопераційний тиристор, електрична потужність, гармонічний аналіз.

**Постановка проблеми.** З метою збільшення ефективності функціонування систем передачі і розподілу електроенергії застосовують заходи щодо підвищення ступеня використання потужності, що надходить в електромережу шляхом зменшення різниці між потужністю генерації від джерел електроенергії та потужністю споживання у вузлах навантаження. Наприклад, динамічна компенсація реактивної потужності, тобто забезпечення балансів реактивної потужності у вузлах електричних мереж, дає змогу зменшити технологічні втрати електроенергії на етапах пересилання та розподілу, підвищити запас стійкості роботи вузлів навантаження, покращити показники якості напруги тощо [1]. Наявність нелінійного навантаження породжує спотворення форм струмів і напруг в електричних мережах, що знижує ступінь використання ліній через появу потужності спотворення [2].

У технології інтелектуальних мереж застосовують статичні джерела реактивної потужності, регульовані засобами силової електроніки – керованими напівпровідниковими вентилями (електронними ключами) [3]. На основі тиристорного регулятора змінної напруги (РЗН) з активним навантаженням, обладнаного двоопераційними тиристорами, можна отримати ресурс реактивної потужності необхідного знаку та кваліфікувати його, як віртуальне джерело реактивної потужності [4, 5]. Фазовим регулюванням повністю керованими тиристорами РЗН досягається зсув основної гармоніки струму відносно напруги живлення. Проте відкритими залишаються питання природи отриманої реактивної потужності, особливо з урахуванням гармонічного спотворення струму живлення, енергетичної участі вентиляльної частини, зведення балансів складових потужності тощо. Актуальним є співставлення отриманого енергетичного ефекту з сучасними теоріями реактивної потужності для нелінійних електричних кіл: теорія миттєвої потужності, теорія обмінної потужності, вентиляна потужність, потужності зсуву та спотворення тощо.

Проблемам теорії потужності та її балансування за складовими в колах із несинусоїдальними за формою струмами та напругами присвячена значна кількість публікацій. Найбільше питань виникає навколо "вентильної потужності", без якої неможливо досягнути балансу потужності в процесі енергообміну [6]. Результати досліджень ряду провідних учених у галузі теорії потужності інтегровані в стандарті IEEE [7], що навело лад у трактуваннях, принаймні, арифметично. Йдеться про вдосконалення спектрального методу K.Budeanu, яке стосується забезпечення еквівалентності втрат активної потужності в мережі енергообміну між джерелом та споживачем [8].



**Метою роботи** є дослідження балансу потужності для РЗН у цілому та тиристорного блоку зокрема в режимах регулювання змінної напруги фазовим керуванням провідного стану двоопераційних тиристорів.

**Задача досліджень.** Отримати вирази для гармонічних складових струмів і напруг для всіх елементів РЗН та за результатами чисельних розрахунків згідно з методикою [7] зробити обґрунтовані висновки щодо балансів складових потужності та участі в ньому вентиляного блоку.

**Виклад основного матеріалу.** Згідно з [7] за несинусоїдальної форми струмів та напруг повна (уявна) потужність від джерела живлення балансується такими складовими:

$$S = UI = \sqrt{S_1^2 + S_N^2} = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2 + D_I^2 + D_U^2 + S_H^2}, \quad (1)$$

де  $U, I$  – середньоквадратичні значення напруги та струму від джерела живлення;

$S_1 = U_1 I_1 = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2} = \sqrt{(U_1 I_1 \cos \varphi_1)^2 + (U_1 I_1 \sin \varphi_1)^2}$  – фундаментальна (за частотою джерела) повна потужність;  $P_1, Q_1$  – активна та реактивна потужності за основною частотою відповідно;  $U_1, I_1$  – середньоквадратичні значення основної гармоніки струму та напруги джерела;  $\varphi_1$  – фазовий кут між векторами основної гармоніки струму та напруги;

$$S_N = \sqrt{S^2 - S_1^2} = \sqrt{D_I^2 + D_U^2 + S_H^2} = \sqrt{(U_1 I_H)^2 + (U_H I_1)^2 + (U_H I_H)^2} - \quad (2)$$

не фундаментальна (не основної частоти) повна потужність,  $D_I = U_1 I_H$  – потужність спотворення струму;  $D_U = U_H I_1$  – потужність спотворення напруги;

$$S_H = U_H I_H = \sqrt{P_H^2 + D_H^2} = \sqrt{\left( \sum_{h \neq 1} U_h I_h \cos \varphi_h \right)^2 + \sum_{h \neq 1} (U_h I_h \sin \varphi_h)^2} - \quad (3)$$

повна гармонічна (не основної частоти) потужність;  $P_H$  – активна гармонічна (не основної частоти) потужність,  $D_H$  – гармонічна потужність спотворення,  $U_H, I_H$  – середньоквадратичні значення напруги та струму не основної частоти,  $U_h, I_h$  – середньоквадратичні значення гармоніки порядку  $h \geq 2$  струму та напруги,  $\varphi_h$  – фазовий кут між векторами струму та напруги однойменної гармоніки  $h$ .

Слід акцентувати, що згідно з [7] активна потужність є арифметичною сумою

$$P = P_1 + P_H, \quad (4)$$

а реактивною означена лише потужність  $Q_1$  за основною гармонікою. Базуючись на (1)–(3), проведено аналіз складових потужності для однофазного РЗН на активному навантаженні, який обладнаний повністю керованими зустрічно-паралельно з'єднаними тиристорами (рис. 1). РЗН живиться від джерела заданої синусоїдальної напруги  $u_s(t) = U_m \sin(\omega t)$ , тиристори VS1, VS2 – ідеальні ключі.

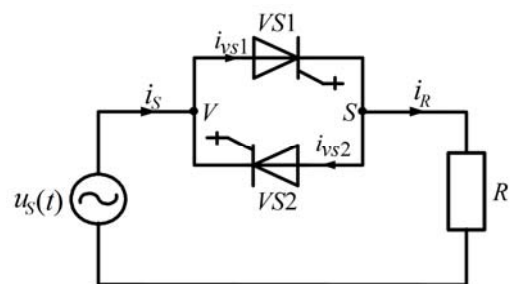
Рівняння балансу потужностей для досліджуваної електричної схеми (рис. 1):

$$S_S^2 = S_R^2 + S_{VS}^2, \quad (5)$$

де  $S_S$  – повна потужність, яку видає джерело синусоїдальної напруги,  $S_R$  – повна потужність навантаження РН,  $S_{VS}$  – повна потужність тиристорного блоку VS.

Розглянемо режим РЗН (рис. 1), повністю керовані тиристори якого відкривають у природні моменти часу  $\omega t_{on}$ , а закривають – випередженням відносно природніх моментів часу закривання [4, 5]. Часові діаграми струмів та напруг РЗН для такого режиму наведено на рис. 2, де  $\beta$  – кут закривання тиристорів (рис. 2 в).

Для складання балансів потужності за формулами для її складових розкладаємо вирази для мит-



**Рис. 1.** Еквівалентна схема однієї фази тиристорного регулятора напруги з активним навантаженням

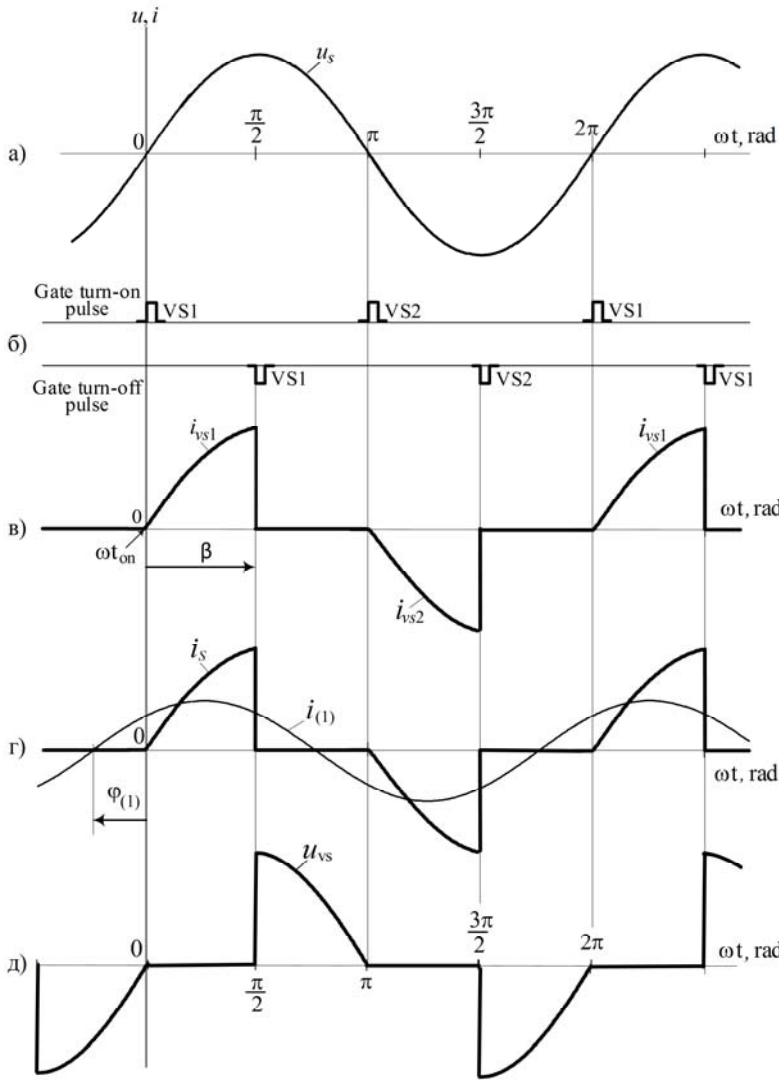


Рис. 2. Часові діаграми струмів і напруг регулятора змінної напруги

тевих значень струмів та напруг РЗН у тригонометричний ряд Фур'є. Зауважимо, що на проміжках часу провідного стану тиристорів VS1, VS2 струм у схемі описується як  $i_S = i_R = \frac{U_m}{R} \sin(\omega t)$ , а в складі потужності синусоїдального джерела напруги живлення будуть відсутні потужність спотворення напруги  $D_U$ , гармонічна потужність  $S_H$  та її компоненти  $P_H$  і  $D_H$ .

Виконаємо гармонічний аналіз вхідного струму  $i_S$  (рис. 2 з), який розповсюдимо на решту послідовно увімкнених елементів РЗН: сумарний струм тиристорного блоку  $i_{VS1,2}$  (рис. 2 в), а також струм та напругу на резистивному навантаженні  $i_R, u_R$ . Результати цього аналізу використаємо для визначення складових потужності РЗН. Остаточні вирази для косинусного та синусного коефіцієнтів ряду Фур'є гармоніки порядку  $n$  для струму  $i_S$  мають вигляд:

$$a_n = \frac{U_m}{2\pi R} \left\{ \frac{1 - \cos(\pi n) - \cos[(1-n)(\pi - \beta)] - \cos[(1-n)(2\pi - \beta)]}{1-n} + \frac{1 - \cos(\pi n) - \cos[(1+n)(\pi - \beta)] - \cos[(1+n)(2\pi - \beta)]}{1+n} \right\}, \quad (6)$$

$$b_n = \frac{U_m}{2\pi R} \left\{ \frac{\sin[(1-n)(\pi - \beta)] + \sin[(1-n)(2\pi - \beta)]}{1-n} - \frac{\sin[(1+n)(\pi - \beta)] + \sin[(1+n)(2\pi - \beta)]}{1+n} \right\}. \quad (7)$$

Звідки для першої гармоніки:

$$a_1 = \frac{U_m}{\pi R} \sin^2 \beta, \quad b_1 = \frac{U_m}{2\pi R} [2(\pi - \beta) + \sin 2\beta]. \quad (8)$$

Результати гармонічного аналізу напруги  $u_{VS}$  на блоці тиристорів VS:

$$a_n = \frac{U_m}{2\pi} \left\{ \frac{\cos(\pi n) - \cos(2\pi n) + \cos[(1-n)(\pi - \beta)] + \cos[(1-n)(2\pi - \beta)]}{1-n} + \frac{\cos(\pi n) - \cos(2\pi n) + \cos[(1+n)(\pi - \beta)] + \cos[(1+n)(2\pi - \beta)]}{1+n} \right\}, \quad (9)$$

$$b_n = \frac{U_m}{2\pi} \left\{ \frac{-\sin[(1-n)(\pi - \beta)] - \sin[(1-n)(2\pi - \beta)]}{1-n} + \frac{\sin[(1+n)(\pi - \beta)] + \sin[(1+n)(2\pi - \beta)]}{1+n} \right\}. \quad (10)$$

Звідки для першої гармоніки:

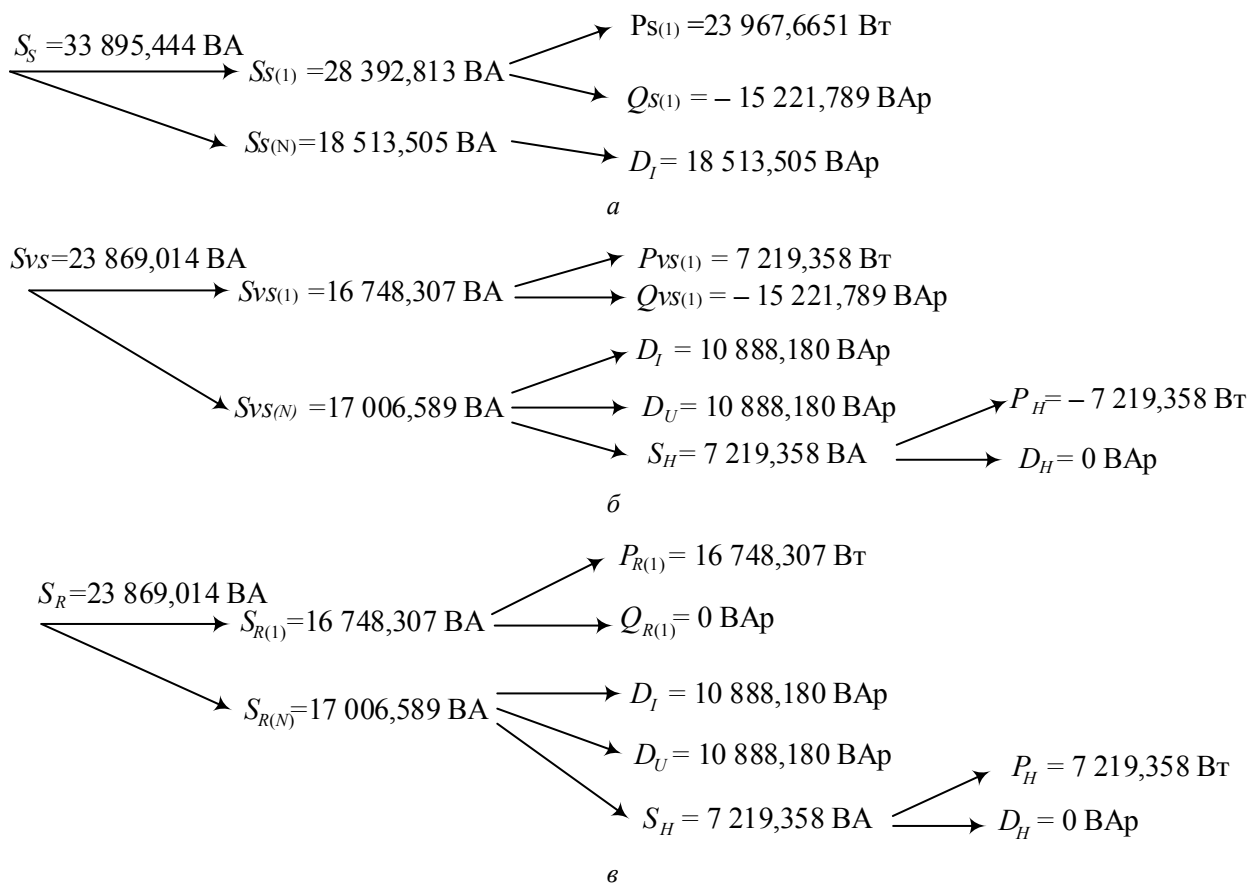
$$a_1 = -\frac{U_m}{\pi} \sin^2 \beta, \quad b_1 = \frac{U_m}{2\pi} (2\beta - \sin 2\beta). \quad (11)$$

Амплітуду та фазу  $n$ -ї гармоніки струму (напруги) визначаємо так:

$$C_{1m(n)} = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}, \quad \varphi_n = \operatorname{arctg} \left( \frac{b_n}{a_n} \right). \quad (12)$$

Розглянемо чисельний приклад розрахунку складових потужності РЗН для таких вхідних даних: напруга живлення  $U_S = 220$  В, опір навантаження  $R = 1$  Ом, кут закривання тиристорів  $\beta = 90$  ел. град, що відповідає максимальному значенню коефіцієнта реактивної потужності [5].

Результати проведеного за формулами (6–12) гармонічного аналізу та визначення складових потужності за виразами (1)–(4) для заданих умов інтегровано у вигляді дерева потужності на рис. 3.



**Рис. 3.** Дерево потужності та її компонент для: *a* – джерела живлення; *б* – тиристорного блоку; *в* – навантаження регулятора змінної напруги

Основні результати:

1. Середньоквадратичні значення струмів джерела, вентиляного блоку та навантаження:  $I = 154,496$  А, основної гармоніки  $I_{(1)} = 129,415$  А, гармонічного струму  $I_H = 84,384$  А, а фазовий кут для основної гармоніки струму  $\varphi_1 = -32,4195$  ел. град. Загальний коефіцієнт гармонічного спотворення струму  $THD_I = I_H / I_1 = 84,384 / 129,415 = 0,6520$ .

2. Для заданих умов ефективні значення напруги на вентиляному блоці та резисторі навантаження:  $U_R = 154,496$  В, напруги основної гармоніки  $U_{R(1)} = 129,415$  В, гармонічної напруги  $U_{R(H)} = 84,384$  В, а фазовий зсув гармонік струму відносно відповідних гармонік напруги  $\varphi_h = 0$  ел. град.



3. Споживання активної потужності, визначене згідно з (4), складає  $P_S = 23967,665$  Вт.

4. Реактивна потужність генерації в мережу живлення  $Q_{S(1)} = -15\,221,789$  ВАР, що для схеми без реактивних елементів означає реактивну потужність зсуву.

5. Баланс активної потужності

$$P_{S(1)} = P_{R(1)} + P_{R(H)} + P_{VS(1)} + P_{VS(H)} = 16748,307 + 7219,358 + 7219,358 - 7219,358 = 23967,665 \text{ Вт.}$$

Гармонічна активна потужність блоку тиристорів  $P_{VS(H)}$  від'ємна, оскільки вищі гармоніки струму й напруги перебувають у протифазі, тобто активні потужності всіх гармонік є від'ємними. Але вона компенсується додатною активною потужністю основної гармоніки  $P_{VS(1)}$ , тому сумарна активна потужність, пов'язана з тиристорним блоком, відсутня. Водночас вищі гармоніки струмів і напруг резистора навантаження перебувають у фазі, і гармонічна потужність навантаження додатна.

6. Повні потужності тиристорного блоку  $S_{VS}$  (рис.3 б) та резистивного навантаження  $S_R$  (рис. 3 в), а також значення фундаментальних  $S_{VS(1)}$ ,  $S_{R(1)}$  і нефундаментальних складових  $S_{VS(N)}$ ,  $S_{R(N)}$  потужності чисельно співпадають. Це пояснюється тим, що тиристорний блок є передавальною ланкою між джерелом напруги та навантаженням. Співпадають також вітки? дерев рис.3 б та рис.3 в, які стосуються складових потужності спотворення  $D_I$ ,  $D_U$ . Різниця спостерігається в знаку гармонічної потужності  $P_H$ . Реактивна потужність зсуву пов'язана повністю з тиристорним блоком, а активна потужність – з резистором навантаження.

Наведені результати дослідження перевірено моделюванням у середовищі Simulink програмного пакету Matlab.

**Висновки.** Підтверджено, що, як передбачено в [6], незважаючи на нульове значення миттєвої потужності, з тиристорним блоком пов'язана потужність зсуву, викликана втручанням у природний спосіб протікання струму штучним зсувом струму відносно напруги на частоті живлення шляхом заміни зовнішнім впливом природної комутації ключових елементів їхньою штучною комутацією.

Не фундаментальна складова потужності РЗН пов'язана з гармонічними складовими спотворених струмів та напруг, породжених тиристорним блоком, які віддзеркалені в резисторі навантаження. Уведення складових потужності спотворення, які супроводжують передачу активної потужності від джерела до навантаження, забезпечує адекватність визначення втрат потужності в елементах електропередачі.

1. Интеллектуальні електричні мережі: елементи та режими: За заг. ред. акад. НАН України О.В. Кириленка. К.: Ін-т електродинаміки НАН України, 2016. 400 с.
2. Жежеленко І.В., Півняк Г.Г., Трофімов Г.Г., Папаїка Ю.А.. Реактивна потужність в електричних мережах. Монографія. М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т "Дніпровська політехніка". Дніпро: НТУ "ДП", 2020. 72 с.
3. Шидловський А. К., Жаркін А.Ф., Новський В.О., Малахатка Д.О. Моделювання режимів роботи статичних синхронних компенсаторів реактивної потужності та фазоповоротних трансформаторних пристроїв для створення гнучких систем передачі змінного струму в ОЕС України. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2014. Вип. 38. С. 18–29.
4. Fediv Y., Sivakova O., Korchak M. Model of Virtual Source of Reactive Power for Smart Electrical Supply Systems. *IEEE 20th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE)*, 1. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1109/CPEE47179.2019.8949159>.
5. Fediv Y., Sivakova O., Korchak M. Multi operated virtual power plant in smart grid. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems*. 2020. Vol. 5. No. 6. Pp. 256–260. DOI: <https://doi.org/10.25046/aj050630>.
6. Новский В.А., Жарский Б.К., Голубев В.В. Баланс мощностей в электрических цепях с ключевыми элементами. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2011. Вип 48. С. 103–113.
7. IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions. IEEE Std. 1459–2010.
8. Emanuel A. Power definitions and the physical mechanism of power flow. Hoboken, N.J. *IEEE Press/Wiley*, 2016. 260 p.

## COMPONENT CAPACITIES OF THE THYRISTOR VOLTAGE REGULATOR WITH ACTIVE LOAD

**E.I. Fediv, O.M. Sivakova,**  
Lviv Polytechnic National University,  
S. Bandery str., 12, Lviv, 79012, Ukraine  
e-mail: [yevhen.i.fediv@lpnu.ua](mailto:yevhen.i.fediv@lpnu.ua)

*A study of the power balance of the semiconductor voltage regulator on an active load with phase control by two-operation thyristors was carried out. The suitability of its use for simultaneous obtaining of the reactive power resource for distribution electric networks has been confirmed. According to the concept of intelligent electrical networks, such devices belong to the class of flexible alternating current transmission systems, and they can be the basis for building virtual energy sources. The power components for individual components of the regulator, including the thyristor block, were studied. The spectral method of describing currents and voltages at the regulator sections is applied. The obtained results of theoretical studies were confirmed by an example with numerical calculations, which made it possible to clarify the physical essence of energy transformations during voltage regulation. Bibl. 8, fig. 3.*

**Key words:** voltage regulator, two-operation thyristor, electric power, harmonic analysis.

1. Intelligent electrical networks: elements and modes: K.: In-т електродинаміки НАН України, 2016. 400 с.
2. Zhezhelenko I.V., Pivniak H.H., Trofimov H.H., Papaika Y.A. Reactive power in electrical networks. Monohrafiia. M-vo osvity i nauky Ukrainy, Nats. tekhn. un-т Dniprovska politekhnika. Dnipro: NTU DP, 2020. 72 p.
3. Shydlovskiy A.K., Zharkin A.F., Novskiy V.O., Malakhatka D.O. Modeling of the operating modes of static synchronous reactive power compensators and phase-reversal transformer devices for the creation of flexible alternating current transmission systems in UES of Ukraine. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky NAN Ukrainy*. 2014. Vyp. 38. Pp. 18–29.
4. Fediv Y., Sivakova O., Korchak M. Model of Virtual Source of Reactive Power for Smart Electrical Supply Systems. *IEEE 20th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE)*, 1–4. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1109/CPEE47179.2019.8949159>.
5. Fediv Y., Sivakova O., Korchak M. Multi operated virtual power plant in smart grid. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems*. 2020. Vol. 5. No. 6. Pp. 256–260. DOI: <https://doi.org/10.25046/aj050630>
6. Novskiy V.A., Zharskiy B.K., Holubiev V.V. Power balance in electrical circuits with key elements. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky NAN Ukrainy*. 2011. Vyp 48. Pp. 103–113.
7. IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions. IEEE Std. 1459–2010.
8. Emanuel A. Power definitions *and the physical mechanism of power flow*. Hoboken, N.J : IEEE Press. Wiley, 2016. 260 p.

Надійшла: 09.07.2024  
Прийнята: 23.07.2024

Submitted: 09.07.2024  
Accepted: 23.07.2024

**ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ ТА АПАРАТИ**

УДК 621.313.322

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2024.68.106>**ЩОДО ВІДНОВЛЕННЯ ПАРКУ ТУРБОГЕНЕРАТОРІВ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ УКРАЇНИ**

**О.Г. Кенцицький<sup>1\*</sup>**, докт. техн. наук, **Крамарський<sup>1\*\*</sup>**, канд. техн. наук, **К.О. Кобзар<sup>2</sup>**, канд. техн. наук

1 – Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна,  
e-mail: [kensitsky@ukr.net](mailto:kensitsky@ukr.net), [kramarsky\\_ied@ukr.net](mailto:kramarsky_ied@ukr.net)

2 – АТ «Українські енергетичні машини»,  
пр. Героїв Харкова, 199, Харків, 61037, Україна  
e-mail: [kk7@ukr.net](mailto:kk7@ukr.net)

*Розглянуто поточний стан енергетичної системи України та основні питання відновлення і модернізації генеруючого устаткування електростанцій країни у новоснний період. Запропоновано відновлювати генерацію на новому рівні із залученням передових досягнень світового та вітчизняного електромашинобудування. При відновленні зруйнованих енергоблоків мають використовуватися турбогенератори з покращеними експлуатаційними характеристиками. Насамперед мова йде про машини із повним повітряним охолодженням із розширеними можливостями маневреності (зокрема й асинхронізовані). Розглянуто основні переваги таких турбогенераторів і визначено елементи і вузли конструкції, технічний стан яких є визначальним фактором забезпечення їхньої надійної експлуатації. Бібл. 14, рис. 6, таблиця.*

**Ключові слова:** турбогенератор, технічний стан, надійність, торцева зона статора.

Із початком повномасштабного вторгнення (лютий 2022 р.) критична інфраструктура країни, зокрема енергетична, зазнала значних руйнувань. Якщо у 2022–2023 рр. об'єктом ворожих атак головним чином були високовольтні розподільчі мережі та підстанції, то з початком 2024 року удари були зосереджені на генерації. Руйнувань зазнали енергоблоки теплових та гідравлічних електростанцій. За наявною інформацією різного ступеня ушкоджень зазнали всі теплові електростанції країни, унаслідок чого більшість із них зупинені. Зруйновано понад 60% енергоблоків [1–5].

Після закінчення бойових дій одним із пріоритетних завдань відбудови країни має бути відновлення її Об'єднаної енергосистеми, насамперед генерації. Адже саме енергоблоки теплових і гідравлічних електростанцій відіграють вирішальну роль у забезпеченні енергосистеми маневреними потужностями, без чого її експлуатація неможлива.

Переважаюча більшість теплових електростанцій в Україні були збудовані у 60-70х роках минулого століття, і на сьогодні 90% турбогенераторів, що експлуатуються у складі їхніх енергоблоків, виробили свій розрахунковий ресурс. За таких умов відновлювати генерацію в початковій конфігурації обладнання енергоблоків недоцільно та вже й неможливо. Теплові електростанції необхідно відбудовувати на принципово новому рівні із залученням передових досягнень світового та вітчизняного електромашинобудування.

Останнім часом у світі спостерігається тенденція зниження попиту на турбогенератори одиничної потужності понад 500 МВт. Виключенням є країни, що розвиваються, в яких будуються енергоблоки атомних електростанцій потужністю 600-1200 МВт. Накопичений у світі досвід проектування турбогенераторів великої потужності створив передумови для удосконалення конструкції машин із повітряним і повітряно-водяним охолодженням у діапазоні



потужностей до 300 МВт при 3000 об./хв. [6, 7] (до цього часу цей діапазон охоплював потужності лише до 100 МВт). Це стало можливим завдяки застосуванню ефективних схем безпосереднього охолодження, термореактивної корпусної ізоляції обмотки статора з підвищеною механічною й електричною міцністю, нових видів ізоляції ротора, електротехнічної сталі із зменшеними питомими втратами, сучасних конструктивних матеріалів. Прикладами таких розробок є турбогенератори потужністю 500 МВА, 50 Гц із повітряним охолодженням фірми *Alstom Power* і потужністю 620 МВА, 50 Гц фірми *Toshiba*.

Подальше підвищення одиничної потужності машин із повітряним охолодженням обмежується нагрівом обмоток, при цьому деяке підвищення потужності на 20–25% у тих же габаритах може бути досягнуте завдяки підвищенню тиску та швидкості циркуляції повітря в корпусі генератора.

На початок вторгнення у складі енергоблоків теплових електростанцій в Україні експлуатувалися понад 90 турбогенераторів потужністю 200 та 300 МВт (75% загальної кількості). І при відновленні зруйнованих, а, можливо, і створенні нових енергоблоків мають використовуватися турбогенератори із покращеними експлуатаційними характеристиками, з урахуванням характеру навантаження, географічного розташування станції, наявності електричних зв'язків тощо. Насамперед мова йде про машини із повним повітряним охолодженням з розширеними можливостями маневреності (зокрема щодо реактивної потужності).

Тут має бути використаний досвід вітчизняних електромашинобудівників щодо створення генеруючого устаткування світового рівня. Фахівцями АТ «Українські енергетичні машини» розроблена серія турбогенераторів ТА з повітряним охолодженням одиничною потужністю від 150 до 400 МВА. Турбогенератори з повним повітряним охолодженням мають низку переваг порівняно з машинами з водневим та воднево-водяним охолодженням, які визначають технічну та економічну доцільність їхнього використання в енергоустановках із підвищеними вимогами щодо надійності та екологічної сумісності, розширення діапазону припустимих навантажень, зниження експлуатаційних витрат [8, 9].

Головними з них є:

- підвищений коефіцієнт готовності 0,997–0,998 порівняно з 0,95–0,995 у турбогенераторів із безпосереднім рідинним та водневим охолодженням;
- спрощені умови експлуатації та ремонту, що скорочують терміни та вартість ремонтних робіт;
- підвищений рівень вибухо- та пожежобезпеки;
- спрощення конструкції, що обумовлює скорочення терміну проектування та вартості виготовлення турбогенераторів;
- полегшення процедури контролю і діагностики технічного стану турбогенератора;
- відсутність допоміжних систем рідинного охолодження обмотки та водневого охолодження осердя статора, а також систем маслозабезпечення ущільнень.

Не менш актуальним завданням при відновленні генерації є створення турбогенераторів із розширеними маневреними характеристиками, зокрема щодо реактивної потужності. Безперечно, тут має бути використаний досвід українських електромашинобудівників щодо створення перших у світі асинхронізованих турбогенераторів. Українськими електромашинобудівниками створена серія турбогенераторів ТАП із повним повітряним охолодженням поздовжньо-поперечного збудження.

Основною перевагою таких машин на додаток до наведених вище є розширений діапазон регулювання по реактивній потужності. На рис. 1 наведено діаграму припустимих навантажень турбогенератора ТАП-220-2, спроектованого на заміну турбогенераторів ТВВ-220-2А енергоблоків № 1 і № 2 Рівненської АЕС.

З рисунку видно, що діапазон регулювання реактивної потужності турбогенератора ТАП-220-2 охоплює від +200 до -250 Мвар. Для наочності пунктирною лінією наведено обмеження в зоні споживання реактивної потужності для турбогенератора ТВВ-220-2А, що сьогодні знаходяться в експлуатації. Тобто можливість споживання реактивної потужності турбогенератором ТАП-220-2 у режимі глибокого недозбудження вдвічі перевищує аналогічний показник турбогенератора ТВВ-220-2А.

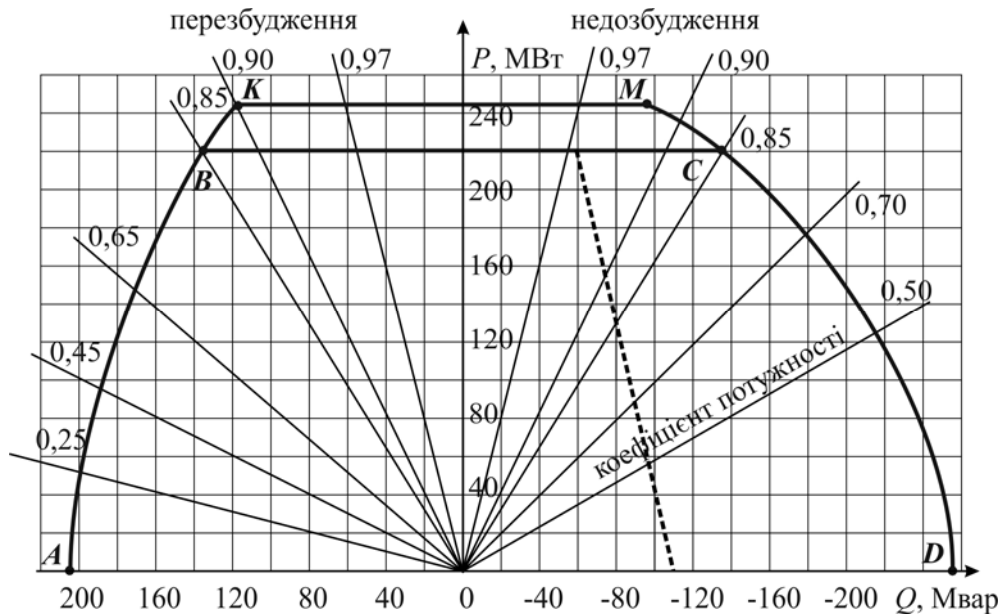


Рис. 1. Діаграма припустимих навантажень турбогенератора ТАП-220-2

У таблиці для порівняння наведено технічні параметри обох турбогенераторів.

При впровадженні в експлуатацію нових типів турбогенераторів додаткова увага має бути приділена таким негативним явищам, що є характерними для цих машин:

- розпушування і перегріву пакетів сталі в торцевій зоні осердя статора;
- послаблення пресування осердя, стирання ізоляції обмотки статора;
- послаблення кріплення стержнів у пазовій і лобовій частині, підвищені вібрації голів лобових частин обмотки статора;
- перегріву, ушкодження ізоляції, деформація витків обмотки ротора та інше.

№ п/п	Параметри	Тип турбогенератора	
		ТАП-220-2	ТВВ-220-2АУЗ
1	Повна номінальна потужність, МВА	259	259
2	Номінальна напруга статора, кВ	15,75	15,75
3	Номінальна потужність, МВт	220	220
4	Номінальний Cos φ	0,85	0,85
5	Номінальний струм статора, А	9487	9487
6	ККД, %	98,7	98,6
7	Лінійне навантаження статора, А/см	1116	1495
8	Кількість обмоток збудження	2	1
9	Охолодження:		
	обмотка статора	опосередковане повітрям	безпосереднє дистиллятом
	осердя статора	безпосереднє повітрям	безпосереднє воднем
	обмотка ротора	безпосереднє повітрям	безпосереднє воднем
	Тиск холодоагенту в корпусі, МПа	0,1	0,3
11	Маса ротора, т	65,0	41,8
12	Маса загальна, т	299	269
13	Коефіцієнт готовності, %	99,85	99,50



Відмінністю турбогенераторів із повним повітряним охолодженням порівняно з машинами традиційної конструкції є підвищені теплові навантаження, особливо в торцевій зоні статора. У зв'язку з чим виникає необхідність удосконалення конструкції торцевої зони статора, яка б забезпечувала необхідну навантажувальну здатність машини.

У традиційних конструкціях основним шляхом вирішення проблеми торцевої зони статора є виконання значного скосу крайніх пакетів осердя, застосування нових конструктивних матеріалів, нових ефективних методів і засобів захисту деталей і вузлів від потоків розсіювання електромагнітного поля, інтенсифікації охолодження. Із перелічених засобів для зниження аксіальних потоків розсіювання в торцевій зоні статора найбільший ефективним є застосування електромагнітних екранів.

Для оцінки ефективності нових екрануючих пристроїв проведено розрахункові та експериментальні дослідження магнітного поля та втрат у крайніх пакетах осердя статора турбогенератора, осьової складової магнітної індукції  $B_z$ , щільності вихрових струмів і нагріву крайніх пакетів, натискного фланця, самого електропровідного екрану для декількох варіантів його конструктивного виконання.

Експериментальні дослідження ефективності електромагнітних екранів різного конструктивного виконання проведені на масштабній фізичній моделі кінцевої зони статора турбогенератора, виготовленій відповідно до умов просторово-часової та магнітної подібності [10]. Досліджено декілька варіантів конструктивного виконання електропровідного екрану, основні з яких показано на рис. 2. Як вихідний варіант розглядається конструкція з електропровідним екраном у вигляді плоского мідного кільця, розташованого між натискним фланцем та активним залізом статора (варіант 1 на рис. 2).

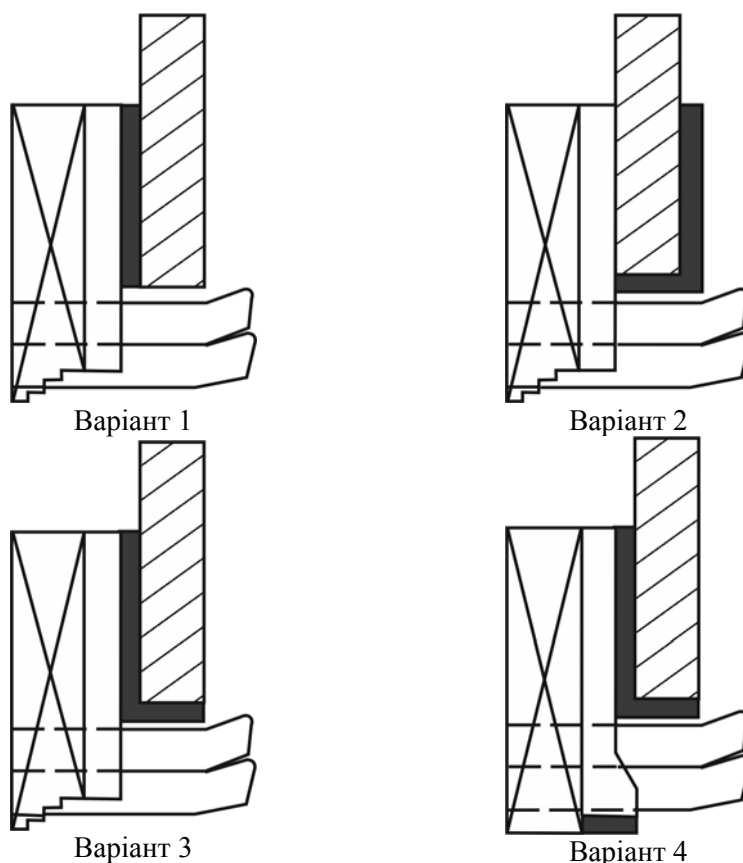


Рис. 2. Варіанти конструктивного виконання електропровідного екрану

У варіанті 2 електропровідний екран розташований на поверхні натискного фланця зі сторони лобової частини обмотки статора (кільцева частина) і має відігнуту циліндричну частину, яка закриває внутрішній край натискного фланця.

У варіанті 3 кільцева частина електропровідного екрана встановлена між натискним фланцем та активним залізом статора, а відігнута циліндрична частина виконана аналогічно варіанту 2.

Варіант 4 є комбінованим електропровідним екраном, в якому до третьої конструкції екрана додається електропровідне кільце (мідь), яке замикає натискні пальці з боку повітряного проміжку між статором і ротором.

Якщо варіанти 1, 2 і 3 електропровідного екрана призначені для зменшення втрат та нагрівів в області дна пазів крайніх пакетів, то варіант 4 повністю захищає крайній пакет осердя статора, включно із зубцевою зоною. Ефективність екранування зони дна пазу крайнього пакету при такому конструктивному виконанні досягається шляхом збільшення поверхні електропровідного екрана та віддалення області концентрації струмів в екрані від зони дна паза крайніх пакетів осердя статора.

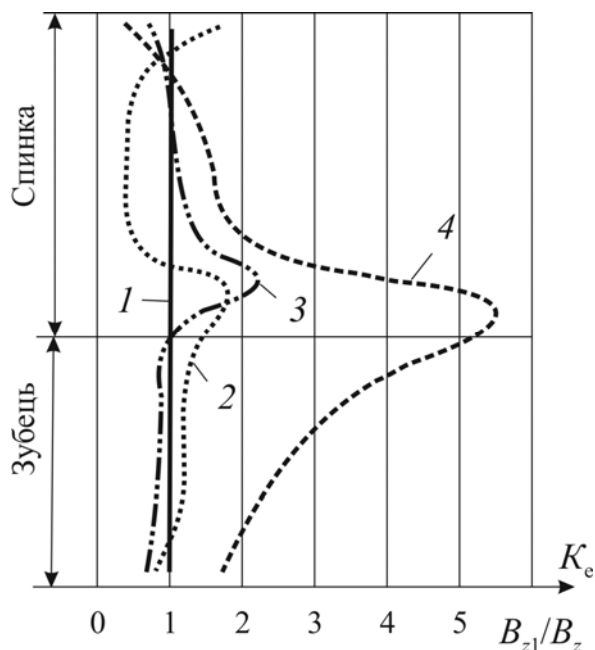


Рис. 3. Експериментально отримані коефіцієнти екранування для чотирьох варіантів конструктивного виконання електропровідного екрана

Основним критерієм ефективності електропровідного екрану є ступінь зменшення осьової компоненти магнітної індукції  $B_z$  на поверхні крайніх пакетів осердя. Якщо осьову компоненту магнітної індукції  $B_z$  на поверхні крайніх пакетів осердя статора у вихідному варіанті 1 прийняти за базову, то відношення осьової компоненти магнітної індукції у базовому варіанті  $B_{z1}$  до осьової компоненти  $B_z$  у варіантах 2, 3, 4 дає значення коефіцієнта екранування  $K_e$ . На рис. 3 показано експериментально отримані на масштабній фізичній моделі коефіцієнти екранування для всіх 4 варіантів конструктивного виконання електропровідного екрана. Для варіанта 3 в зоні дна паза  $K_e = 2,3$ , хоча в зубцевій зоні ефективність екранування трохи нижча ніж у варіанті 1 ( $K_e = 0,9 - 0,95$ ). Варіант 4 в зубцевій зоні крайніх пакетів має  $K_e = 1,7 - 4,5$ , а в області дна паза –  $K_e = 5,5$ .

Конструкція електропровідного екрана відповідно до варіанту 3 пройшла ретельну експериментальну перевірку на серійних турбогенераторах ТГВ-200-2М в умовах експлуатації.

На рис. 4 показано розподіл температури у першому крайньому пакеті осердя статора для двох турбогенераторів, один з яких виготовлений без електропровідного екрана, інший – з електропровідним екраном за варіантом 3. Дані наведено з одним активним навантаженням  $P = 175$  МВт і  $\cos \varphi = \text{var}$ . Окрім того, криві 1 відповідають  $\cos \varphi = 0,88$  (перезбудження), криві 2 –  $\cos \varphi = 1,0$ , криві 3 –  $\cos \varphi = 0,98$  (недозбудження).

Дієвим засобом боротьби з тангенціальними нерівномірністю осьового компонента магнітної індукції  $B_z$  у зубцевій зоні крайнього пакета осердя статора є виконання в зубцях шліців спеціальної конфігурації. Оскільки магнітний потік розсіювання паза має максимальне значення в зоні коронки зубця, а в нижній частині паза майже дорівнює нулю, то виконання косих шліців, нижній край зміщений в напрямку обертання поля, дає змогу вирівняти в зубцях щільність вихрових струмів по тангенціальній координаті та зменшити додаткові втрати. Проведені розрахунки щільності вихрових струмів та втрат для сегмента статора з двома косими шліцами в зубцях показали, що оптимальне зміщення основи шліца в напрямку обертання поля має ділити ширину корони зубця у відношенні 0,15/0,35/0,5. Втрати в зубцях за такої умови зменшуються на 10%.

Проведений на математичній моделі варіантний аналіз конструкції торцевої зони осердя статора потужного турбогенератора дав змогу обґрунтувати конструкцію крайніх пакетів. На торцевій поверхні осердя статора висота зубців має становити половину висоти

зубців пакетів центральної зони, а до сьомого пакету їхня висота має збільшуватися до висоти зубців основних пакетів. Саме така конструкція крайніх пакетів має бути закладена у конструкцію торцевої зони статора турбогенератора з повним повітряним охолодженням.

Під час створення турбогенераторів із повним повітряним охолодженням мають бути застосовані нові технічні рішення щодо систем екранування крайніх пакетів осердя статора.

Відповідно до [11] традиційна система екранування за допомогою електромагнітного екрану 1, розташованого між натискною плитою 2 і пальцями 3 (рис. 5), доповнюється екрануючим короткозамкнутим кільцем 4, встановленим на торцевих поверхнях пальців із боку зазору.

Саме кільце в аксіальному напрямку розділене на кілька кілець, кожне з яких електрично з'єднане з одним із пальців, розташованих на одному зубці, а палець виконаний подовженим в радіальному напрямку за верхній стержень обмотки. Пальці на зубцях осердя, чергуючись по колу, з'єднані електрично з різними кільцями. За необхідності обмеження величини циркуляційних струмів короткозамкнуті кільця можуть бути виконані у вигляді сегментів, які електрично не пов'язані між собою. Зазначена конструкція дає змогу покращити екранування торцевої зони сердечника від осьової складової індукції, що забезпечує підвищення надійності електричної машини завдяки зниженню електромагнітних та теплових навантажень на крайні пакети осердя статора та зниженню втрат в елементах екрану.

Запропонована нова конструкція електромагнітного екрану [12], в якій зубчастий електромагнітний екран 1 між натискною плитою і натискними пальцями (рис. 6) має подовжені зубці між стержнями обмотки, а кінцева частина зубців на рівні розточування статора загнута в напрямку лобових частин обмотки. Для виключення перетоку тепла від електромагнітного екрану до натискних пальців і крайнього пакета осердя зубці електромагнітного екрану виконані таким чином, що не торкаються натискних пальців. Для інтенсифікації охолодження екрану в його зубцях виконані вентиляційні отвори 2.

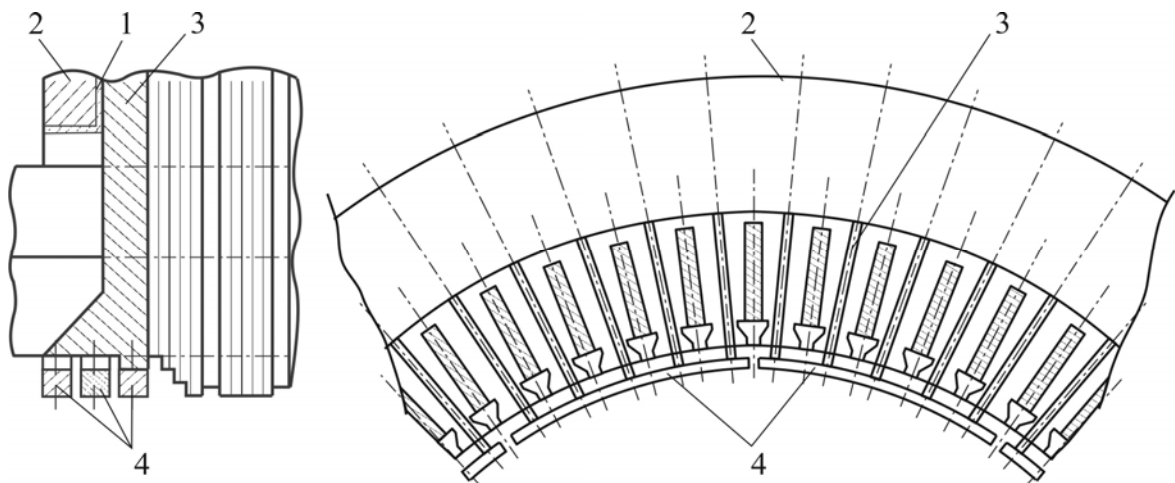


Рис. 5. Система екранування з екрануючим короткозамкнутим кільцем

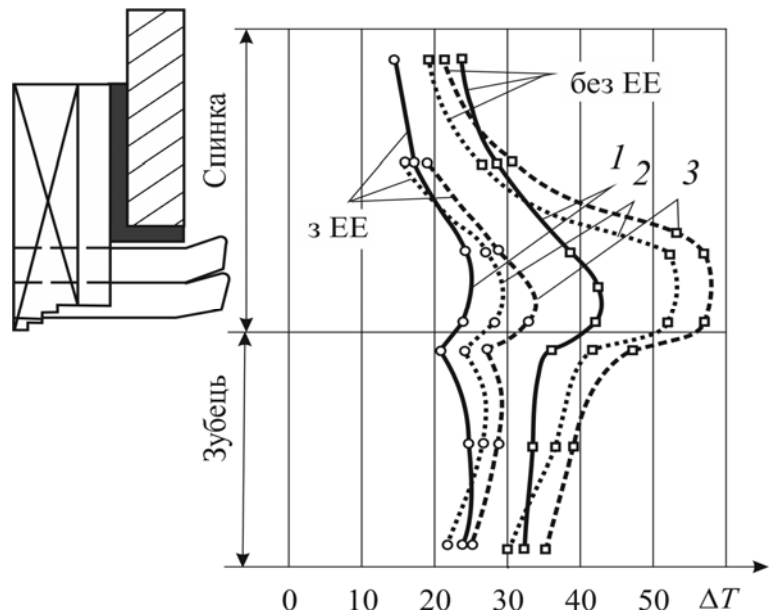


Рис. 4. Розподіл температури у першому крайньому пакеті осердя статора для двох турбогенераторів

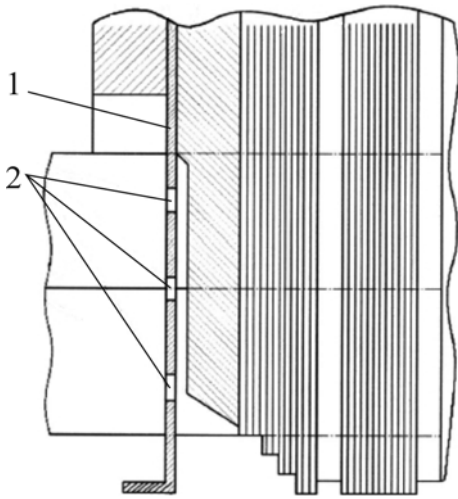


Рис. 6. Конструкція електромагнітного екрана

Технічне рішення [13] спрямоване на вдосконалення кріплення стержнів обмотки статора на виході з осердя завдяки фіксації крайніх ущільнюючих клинів, зменшенню довжини консольної ділянки лобових частин обмотки і, відповідно, зменшенню амплітуди їхніх коливань [14], підвищенню механічної стійкості статора турбогенератора в цілому.

**Висновки.** 1. Відновлювати генерацію енергосистеми країни необхідно на принципово новому рівні із залученням передових досягнень світового та вітчизняного електромашинобудування. Насамперед мова йде про турбогенератори з повним повітряним охолодженням із розширеними можливостями маневреності (зокрема й асинхронізовані).

2. Під час створення нових турбогенераторів мають бути впроваджені ефективні технічні рішення щодо підвищення надійності та навантажувальної здатності машин в експлуатації. Насамперед це стосується

забезпечення припустимого рівня нагрівів елементів торцевої зони та механічної стійкості осердя статора в цілому.

1. Тарасовський Ю. Всі енергоблоки Бурштинської та Ладижинської ТЕС пошкоджені внаслідок атаки Росії – ДТЕК. *Forbes Ukraine*. URL: <https://forbes.ua/news/vsi-energlobloki-burshtinskoj-ta-ladzhinskoj-tes-poshkodzhenni-vnaslidok-ataki-rosii-dtek-28032024-20178> (дата звернення: 24.04.2024).
2. Музиченко О. Знищення Трипільської ТЕС: що відомо про терміни відновлення та чи можливо це взагалі. *TSN.UA*. URL: <https://tsn.ua/ukrayina/znischennya-tripilskoyi-tes-scho-vidomo-pro-termi-vidnovlennya-ta-chi-mozhливо-ce-vzagali-2555473.html> (дата звернення: 24.04.2024).
3. Орлюк М. Знищені всі енергоблоки: «Центренерго» заявило про руйнування Зміївської ТЕС на Харківщині. *БІЗНЕС ЦЕНЗОР*. URL: [https://biz.censor.net/news/3481821/znyscheni\\_vsi\\_energlobloky\\_tsentrenergo\\_zayavilo\\_pro\\_ruyinuvannya\\_zmiyivskoyi\\_tes\\_na\\_harkivschyni](https://biz.censor.net/news/3481821/znyscheni_vsi_energlobloky_tsentrenergo_zayavilo_pro_ruyinuvannya_zmiyivskoyi_tes_na_harkivschyni) (дата звернення: 24.04.2024).
4. На ДніпроГЕС пошкоджене обладнання електростанції – Кудрицький. *Укрінформ*. URL: <https://www.ukrinform.ua/rubric-economy/3843201-na-dniproges-poskodzene-obladnanna-elektrostantsii-kudrickij.html> (дата звернення: 24.04.2024).
5. Зануда А. Таких точних ударів раніше не було. Ситуація в енергетиці гірша за першу воєнну зиму: до чого готуватися. *BBC News Україна*. URL: <https://www.bbc.com/ukrainian/articles/c25r401v12po> (дата звернення: 24.04.2024).
6. Air Cooled Turbogenerators. URL: <https://www.ansaldoenergia.com/fileadmin/Brochure/AnsaldoEnergia-AirCooledturbogenerators-20220731.pdf> (дата звернення: 30.04.2024).
7. SGen-1000A generator series. URL: <https://www.siemens-energy.com/global/en/home/products-services/product/sgen-100a.html> (дата звернення: 30.04.2024).
8. Зозулін Ю.В., Антонов О.С., Бичік В.М., Боричевський А.М. та ін. Створення нових типів та модернізація діючих турбогенераторів для теплових електричних станцій. Харків: ПФ «Колегіум», 2011. 228 с.
9. Кенсицький О.Г., Ключников А.А., Федоренко Г.М. Безопасность, надежность и эффективность эксплуатации электротехнического и электроэнергетического оборудования блоков АЭС. Чернобыль (Киев, обл.): Ин-т проблем безопасности АЭС, 2009. 240 с.
10. Веников В.А., Иванов-Смоленский А.В. Физическое моделирование электрических систем. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1956. 359 с.
11. Смородін В.І., Крамарський В.А., Черемісов І.Я., Кузьмін В.В. та ін. Статор електричної машини. Патент України № 303, 1993.
12. Крамарський В.А., Хвалін Д.І., Кобзар К.О. Статор електричної машини. Патент України № 148091, 2021.
13. Крамарський В.А., Черемісов І.Я., Грубой О.П., Титко О.І. та ін. Статор електричної машини. Патент України № 99571, 2015.
14. Кучинський К.А., Крамарський В.А. Розрахункова оцінка вібропереміщень і ізоляції лобової частини обмотки статора потужного турбогенератора. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2022. Вип. 63. С. 45–51. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2022.63.045>

1 – Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,  
ave. Beresteyskyi, 56, Kyiv, 03057, Ukraine  
e-mail: [kensitsky@ukr.net](mailto:kensitsky@ukr.net), [kramarsky\\_ied@ukr.net](mailto:kramarsky_ied@ukr.net)  
2 – JSC Ukrainian energy machines,  
pr. Heroiv Kharkova, 199, Kharkiv, 61037, Ukraine  
e-mail: [kk7@ukr.net](mailto:kk7@ukr.net)

*The current state of the electric power system of Ukraine is considered. The basic principles of restoration and modernization of the generating equipment of the country's power plants in the postwar period are formulated. It is proposed to restore generation at a fundamentally new level with the involvement of advanced achievements of the world and domestic electrical engineering. When restoring destroyed power units, turbine generators with improved performance characteristics should be used selectively, taking into account the nature of the load, the geographical location of the plant, the availability of electrical connections, etc. First of all, we are talking about fully air-cooled machines with enhanced maneuverability (including asynchronous ones). The main advantages of such turbogenerators are named and the elements and components of the structure are identified, the technical condition of which is generally a determining factor in ensuring reliable operation. Examples of technical solutions to improve stator reliability are given. Ref. 14, fig. 6, table.*

**Keywords:** turbogenerator, technical condition, reliability, stator end zone.

1. Tarasovskiy Yu. All power units of Burshtyn and Ladyzhyn TPP were damaged as a result of the Russian attack – DTEK. *Forbes Ukraine*. URL: <https://forbes.ua/news/vsi-energobloki-burshtynskoi-ta-ladzhynskoi-tes-poshkodzhenni-vnaslidok-ataki-rosii-dtek-28032024-20178> (Accessed: 24.04.2024). (Ukr)
2. Muzychenko O. Destruction of the Trypillia TPP: what is known about the terms of restoration and whether it is possible at all. *TSN.UA*. URL: <https://tsn.ua/ukrayina/znischennya-tripilskoyi-tes-scho-vidomo-pro-termini-vidnovlennya-i-chi-mozhливо-ce-vzagali-2555473.html> (Accessed: 24.04.2024). (Ukr)
3. Orliuk M. All power units were destroyed: Centernergo announced the destruction of the Zmiiv TPP in Kharkiv region. *BIZNES TSENZOR*. URL: [https://biz.censor.net/news/3481821/znyscheni\\_vsi\\_energobloky\\_tsentrnergo\\_zavyvylo\\_pro\\_ruyinuvannya\\_zmiivskoyi\\_tes\\_na\\_harkivschyni](https://biz.censor.net/news/3481821/znyscheni_vsi_energobloky_tsentrnergo_zavyvylo_pro_ruyinuvannya_zmiivskoyi_tes_na_harkivschyni) (Accessed: 24.04.2024). (Ukr)
4. The equipment of the power plant was damaged at the Dnipro HPP – Kudrytskyi. *Ukrinform*. URL: <https://www.ukrinform.ua/rubric-economy/3843201-na-dniproges-poskodzene-obladnanna-elektrostantsii-kudrickij.html> (Accessed: 24.04.2024). (Ukr)
5. Zanuda A. There were no such accurate strikes before. The situation in the energy sector is worse than the first winter of the war: what to prepare for. *BBC News Україна*. URL: <https://www.bbc.com/ukrainian/articles/c25r401v12po> (Accessed: 24.04.2024). (Ukr)
6. Air Cooled Turbogenerators. URL: <https://www.ansaldoenergia.com/fileadmin/Brochure/AnsaldoEnergia-AirCooledturbogenerators-20220731.pdf> (Accessed 30.04.2024)
7. SGen-1000A generator series. URL: <https://www.siemens-energy.com/global/en/home/products-services/product/sgen-100a.html> (Accessed: 30.04.2024)
8. Zozulin Y.V., Antonov O.Y., Bychik V.M., Borychevskiy A.M., and others. Creation of new types and modernization of operating turbogenerators for the thermal electric stations. Kharkiv: PF Kolehium, 2011. 228 p. (Ukr)
9. Kensytskyi O.H., Kliuchnykov A.A., Fedorenko G.M. Safety, reliability and efficiency of exploitation of electrical engineering and electroenergy equipment of blocks NPP. Chornobyl: Institute for safety problems of nuclear power plants, 2009. 240 p. (Rus)
10. Venikov V.A., Ivanov-Smolenskiy A.V. Physical modeling of electrical systems. M.-L.: Gosenergoizdat, 1956. 359 p. (Rus)
11. Smorodin V.I., Kramarskiy V.A., Cheremisov I.Ia., Kuzmyn V.V., and others. Stator for an electric machine. Patent UA No 303, 1993. (Ukr)
12. Kramarskiy V.A., Khvalin D.I., Kobzar K.O. Stator for an electric machine. Patent UA No 148091, 2021. (Ukr)
13. Kramarskiy V.A., Cheremisov I.Ia., Hruboi O.P., Tytko O.I., and others. Stator for an electrical machine. Patent UA No 99571, 2015. (Ukr)
14. Kuchynskiy K.A., Kramarskiy V.A. Calculated assessment of vibration movements and isolation of the frontal part of the stator winding of a powerful turbogenerator. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky NAN Ukrainy*. 2022. Вип. 63. Pp. 45–51. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2022.63.045> (Ukr)

Надійшла: 11.06.2024  
Прийнята: 08.08.2024

Submitted: 11.06.2024  
Accepted: 08.08.2024



## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ БЕЗКОНТАКТНИХ МАГНІТОЕЛЕКТРИЧНИХ ТАХОГЕНЕРАТОРІВ

**К.П. Акинін\***, докт. техн. наук, **В.Г. Кіреєв\*\***, канд. техн. наук, **І.С. Петухов\*\*\***, докт. техн. наук, **А.А. Філоменко\*\*\*\***, канд. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна  
e-mail: [kvg2016@ukr.net](mailto:kvg2016@ukr.net)

*Статтю присвячено дослідженню характеристик та режимів роботи безконтактного магнітоелектричного тахогенератора, що реалізуються на основі традиційної радіальної електричної машини з безпазовим статором та з постійними магнітами на роторі. Досліджено варіанти формування вихідного сигналу постійного струму за допомогою діодного і транзисторного випрямлячів. Отримано залежності середньої величини вихідного сигналу напруги, крутизни вихідного сигналу, коефіцієнта відхилення характеристики від її заданого значення та коефіцієнта пульсацій сигналу залежно від швидкості обертання валу ротора. Досліджено вплив ємності фільтруючого конденсатора на величину розмаху пульсацій вихідного сигналу. Бібл. 13, рис. 9, таблиця.*

**Ключові слова:** тахогенератор постійного струму, електрична безконтактна машина з постійними магнітами, випрямляч.

Невід'ємною складовою багатьох автоматичних електромеханічних систем зі зворотними зв'язками є пристрої вимірювання кутової швидкості виконавчого двигуна [1-4]. Такі датчики вимірювання кутової швидкості можуть бути дуже різні за принципом дії. Одним із відомих підтипів таких пристроїв є електричні тахогенератори, на виході яких формується ізолюваний аналоговий сигнал напруги, пропорційний швидкості обертання валу двигуна.

Традиційно вже протягом багатьох десятиліть тахогенератори виконуються з механічними щітками [5]. Такі пристрої знаходять застосування й у наш час [6, 7]. Недоліком таких тахогенераторів є наявність механічних комутаторів, що обмежує ресурс їхньої роботи, спричиняє падіння напруги та пульсації на обертовому механічному контакті. Для часткового усунення зазначених недоліків пластини комутаторів виготовляють зі сплаву, що містить 95% срібла [7].

Унаслідок існуючих історичних тенденцій вдосконалення електричних машин і очевидних переваг безконтактних конструкцій відбувається процес заміни тахогенераторів з механічними щітками на їхні безконтактні аналоги [8-10]. Природно, функції обертових механічних контактів повинні реалізовуватися за допомогою електронних схем.

Безконтактні магнітоелектричні тахогенератори (БМТ) з'явилися одночасно з початком розвитку напряму безконтактних магнітоелектричних двигунів. БМТ є пристрій, в якому багатофазна змінна напруга статорних обмоток перетворюється в постійний сигнал напруги за допомогою напівпровідникового випрямляча.

**Метою статті** є дослідження характеристик та режимів роботи БМТ, які реалізуються на основі традиційної радіальної безконтактної електричної машини з безпазовим статором і з постійними магнітами на роторі. Водночас питання побудови активних зон генераторів у статті не розглядаються, це було зроблено авторами раніше в попередніх дослідженнях [11, 12] стосовно різних типів магнітоелектричних машин. Головна увага в цій статті приділяється питанням формування первинного сигналу на виході випрямляча, але тут не розглядаються проблеми побудови систем зміни полярності сигналу напруги залежно від напрямку обертання.

**Основний матеріал і результати дослідження.** У цій статті розглядається БМТ, який за параметрами має відповідати електричному тахогенератору ТПП-1 із механічними щітками [5]. Цей тахогенератор має такі основні параметри: номінальна швидкість – 7000 об/хв;



максимальна швидкість – 9000 об/хв; крутизна вихідного сигналу напруги – 5-6 В на тисячу обертів за хвилину; пульсації вихідної напруги – не більше 0,5 В, зовнішній діаметр – 32 мм.

Для перетворення системи трифазної змінної напруги статора БМТ у постійну напругу розглянемо два варіанти напівпровідникових схем. У першому випадку використовуємо найпростішу схему пасивного випрямляча, реалізованого на діодах Шотки (рис. 1). У другому випадку використовуємо активний випрямляч на основі керованих ключів із двосторонньою провідністю, наприклад MOSFET (рис. 2).

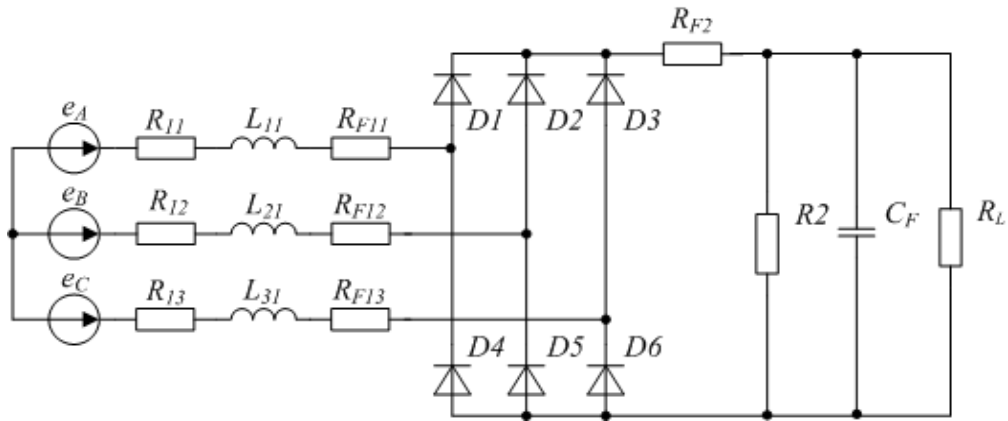


Рис. 1. БМТ з пасивним випрямлячем на основі діодів Шотки

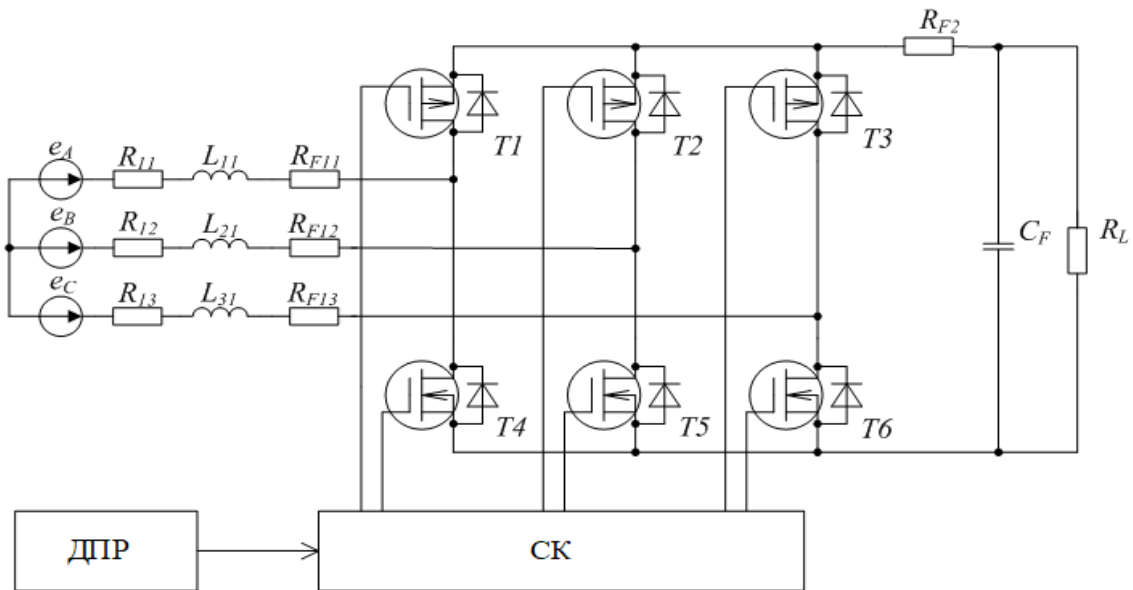


Рис. 2. БМТ з активним випрямлячем на основі MOSFET

Первинними сигналами на вході схеми випрямлення є три статорні ЕРС

$$e_A = k_m \omega \sin \omega t; \quad e_B = k_m \omega \sin(\omega t + 2\pi/3); \quad e_C = k_m \omega \sin(\omega t - 2\pi/3),$$

де  $k_m$  і  $\omega$  – постійний коефіцієнт електричної машини і кутова швидкість обертання ротора генератора;  $t$  – час. Тахогенератор характеризується такими параметрами:  $k_m = 0,03575 \text{ В с}$ ,  $L_{11} = L_{12} = L_{13} = 8,19 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$ ,  $R_{11} = R_{12} = R_{13} = 27,3 \text{ Ом}$ .

На рис. 1, 2 представлені позначення: D1-D6 – діодний випрямляч; T1-T6 – транзисторний випрямляч;  $R_L$  – опір навантаження тахогенератора, причому його номінальне значення дорівнює 3 кОм; ДПР – датчик положення ротора; СК – система керування транзисторною схемою випрямлення.  $R_2$  – опір, що враховує споживання системи керування вихідним інвертором напруги (на рис. 2 його не показано).  $R_{F11}$ ,  $R_{F12}$ ,  $R_{F13}$ ,  $R_{F2}$ ,  $C_F$  – елементи RC-

фільтрів, причому  $R_{F11}=R_{F12}=R_{F13}=R_{F1}$ . Для згладжування пульсацій вихідної напруги розглянемо два варіанти реалізації  $RC$ -фільтра, коли один із параметрів  $R_{F1}$  або  $R_{F2}$  дорівнює нулю.

У цій статті першочергову увагу приділено властивостям схеми випрямлення змінних статорних ЕРС і формуванню постійного сигналу напруги, пропорційного значенню швидкості обертання. Тому на рис. 1 і 2 не показані схеми вихідних інверторів вихідних сигналів напруги випрямлячів, причому полярність вихідної напруги такого інвертора залежить від напрямку обертання валу тахогенератора. Такі інвертори можуть бути реалізовані різними способами, наприклад, на основі біполярних транзисторів або на основі MOSFET. Очевидно, що інвертор на основі MOSFET внаслідок малості падіння напруги на опорах таких транзисторів практично не вплине на величину вихідного сигналу. Водночас інвертор на основі малопотужних біполярних транзисторів внесе деяку похибку в результат вимірювання вихідного сигналу напруги, але не більш ніж десяті частки вольт. Характеристики для схеми з діодним випрямлячем та інвертором на біполярних транзисторах будуть наведені наприкінці результатів досліджень.

Нарешті ще однією особливістю побудови БМТ може бути вимога використання ЕРС статора генератора для живлення системи управління вихідним інвертором напруги. Для реалізації транзисторного трифазного випрямляча, що працює в широкому діапазоні швидкостей тахогенератора від нульових значень, потрібне забезпечення зовнішнього додаткового живлення.

Для оцінки режимів роботи БМТ використовуватимемо такі показники:  $U_o$  – середня напруга на виході випрямляча;  $k$  – крутизна вихідного сигналу напруги, величина якого визначається за формулою  $k_i = 1000 \frac{U_{oi}}{n_i}$ , де  $n$  – швидкість тахогенератора в обертах за хвилину;  $i$  – індекс, який показує, що крутизна визначається при довільному значенні швидкості;  $k_D$  – коефіцієнт відхилення характеристики БМТ від її значення при швидкості 7000 об/хв, ця величина визначається для кожного довільного вимірювання як  $k_D = \frac{k_{7000} - k_i}{k_{7000}} 100$ ;  $\Delta U$  – розмах пульсацій вихідного сигналу  $U_o$ ;  $k_p$  – коефіцієнт пульсацій у відсотках, визначається як  $K_p = \frac{\Delta U_i}{2U_{oi}} \cdot 100$ ;  $I$  – діюче значення змінного струму у фазній обмотці статора.

У цій статті розглянемо такі варіанти схем випрямлення змінних ЕРС статора для експериментальних досліджень:

1. схема з діодним випрямлячем без вихідного інвертора при  $R_{F1}=0$  і  $R_{F2}=130 \text{ Ом}$ ;
2. схема з діодним випрямлячем без вихідного інвертора при  $R_{F1}=68 \text{ Ом}$  і  $R_{F2}=0$ ;
3. схема з транзисторним випрямлячем без вихідного інвертора при  $R_{F1}=0$  і  $R_{F2}=130 \text{ Ом}$ ;
4. схема з транзисторним випрямлячем без вихідного інвертора при  $R_{F1}=68 \text{ Ом}$  і  $R_{F2}=0$ .

Для схем  $RC$ -фільтрів вибрано опори зі стандартного ряду значень.

На рис. 3-6 показані графіки експериментальних залежностей напруги  $U_o(n)$  на виході випрямляча, крутизни  $k(n)$  вихідного сигналу напруги, коефіцієнта  $k_D(n)$  відхилення характеристики і коефіцієнта пульсацій  $k_p(n)$  в діапазоні зміни швидкості обертання до 9000 об/хв. У таблиці наведені максимальні діючі значення  $I$  струму статора, максимальні величини розмаху пульсацій  $\Delta U$  вихідного сигналу напруги в усьому частотному діапазоні та значення крутизни  $k$  вихідного сигналу при  $n=7000 \text{ об/хв}$  для чотирьох розглянутих варіантів схем, де  $N$  – номер схеми.

$N$	$I, A$	$\Delta U, B$	$k_{7000}, B/1000 \text{ об/хв}$
1	0,0325	0,44	5,14
2	0,0327	0,45	5,257
3	0,0171	0,47	5,73
4	0,0175	0,48	5,83

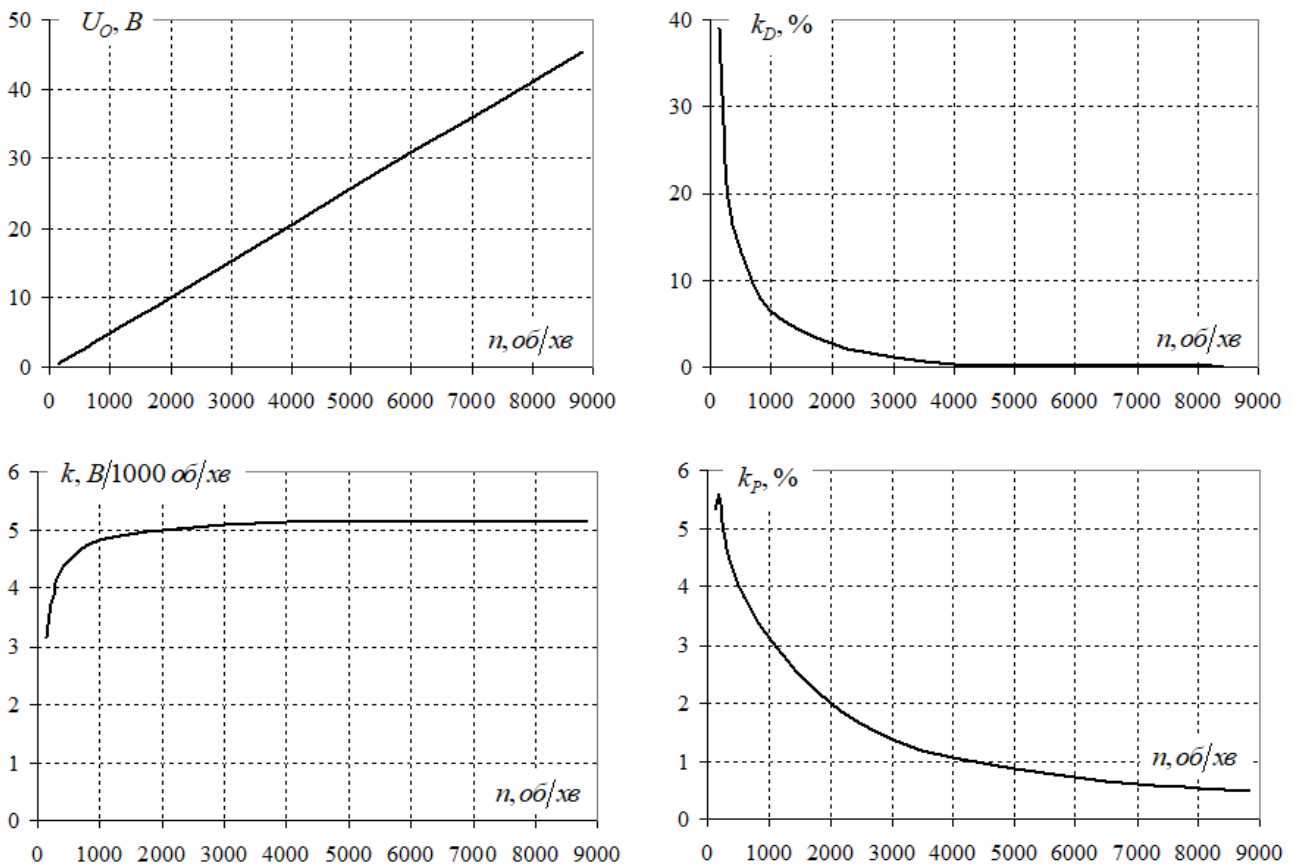


Рис. 3. Експериментальні залежності БМТ з першим варіантом схеми

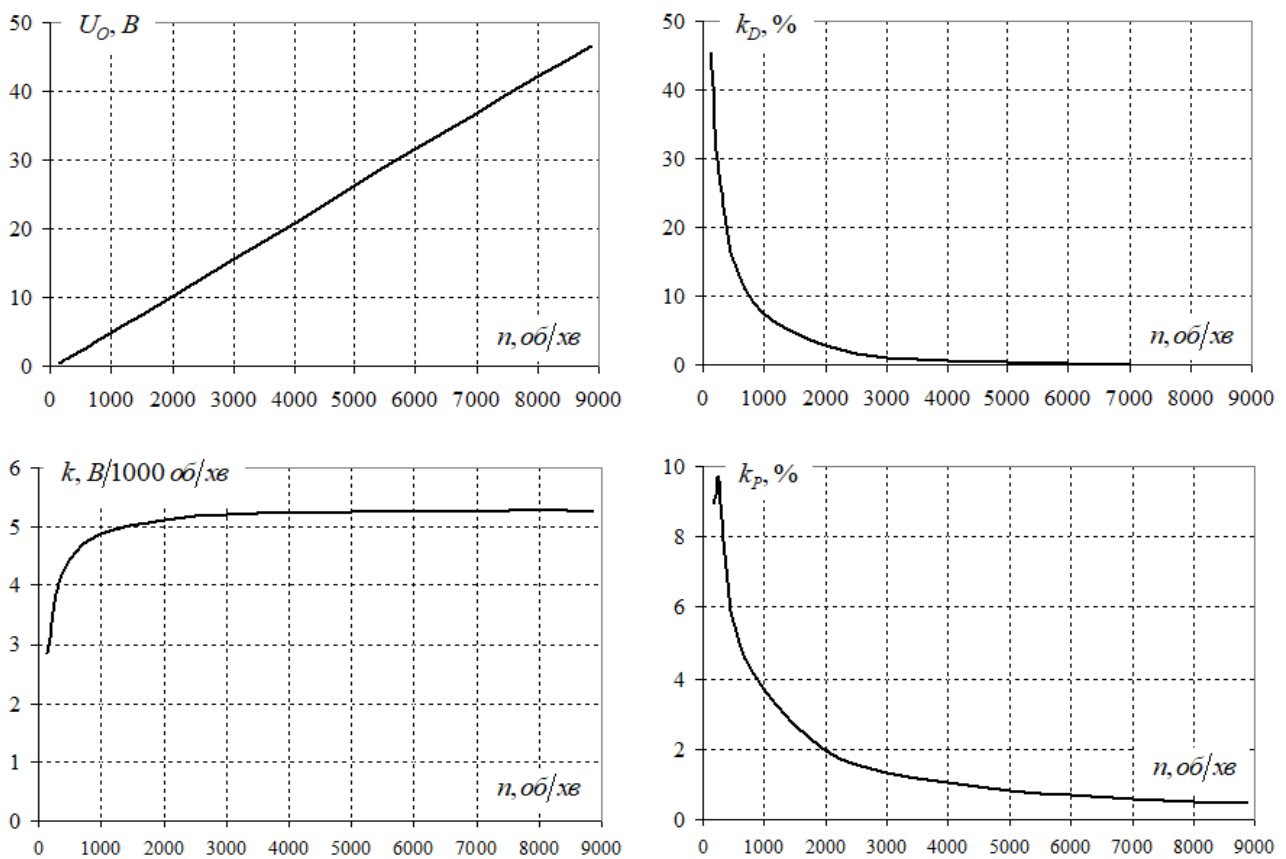


Рис. 4. Експериментальні залежності БМТ з другим варіантом схеми

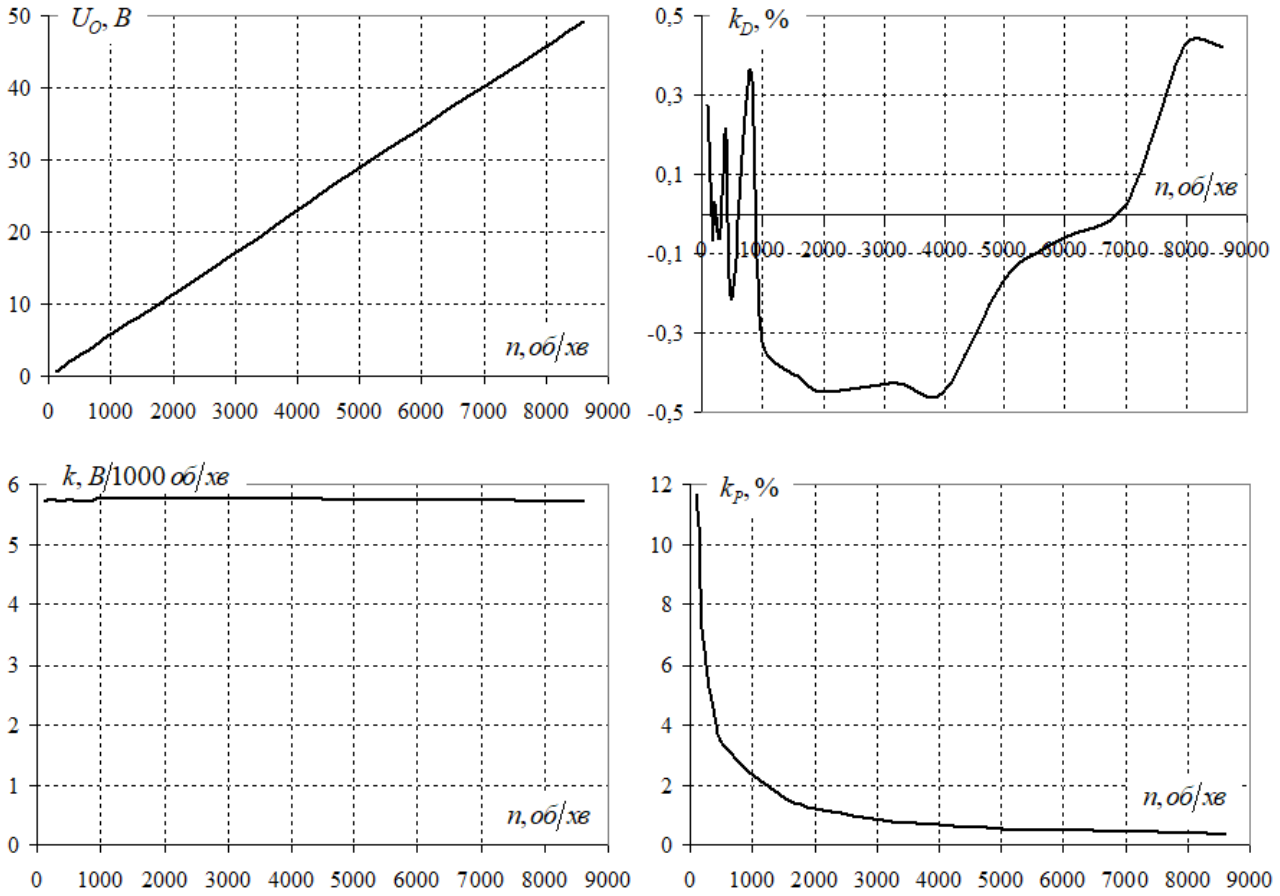


Рис. 5. Експериментальні залежності БМТ з третім варіантом схеми

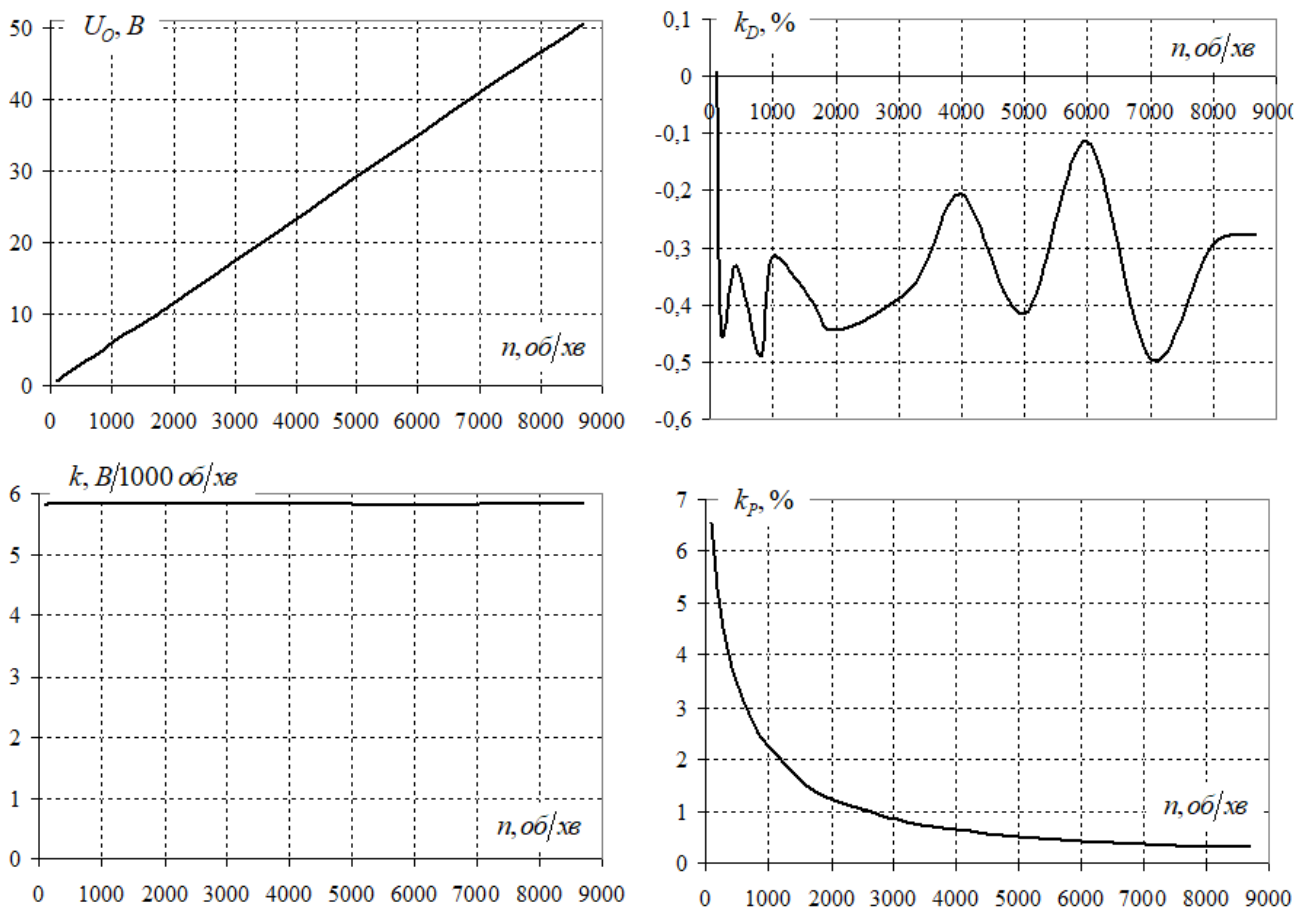


Рис. 6. Експериментальні залежності БМТ з четвертим варіантом схеми

На рис. 7, 8 показані графіки експериментальних залежностей напруги  $U_o(n)$  на виході випрямляча та коефіцієнта  $k_D(n)$  відхилення характеристики схем з діодними випрямлячами (варіанти 1 і 2), але з підключеними на виході інверторами, побудованими на основі малопотужних біполярних транзисторів.

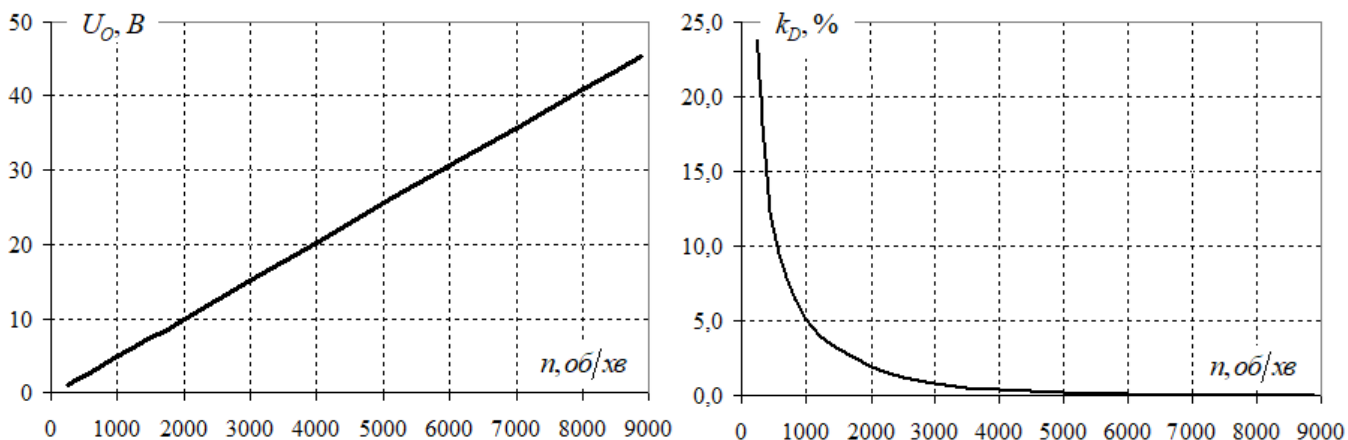


Рис. 7. Експериментальні залежності БМТ з першим варіантом схеми та вихідним транзисторним інвертором

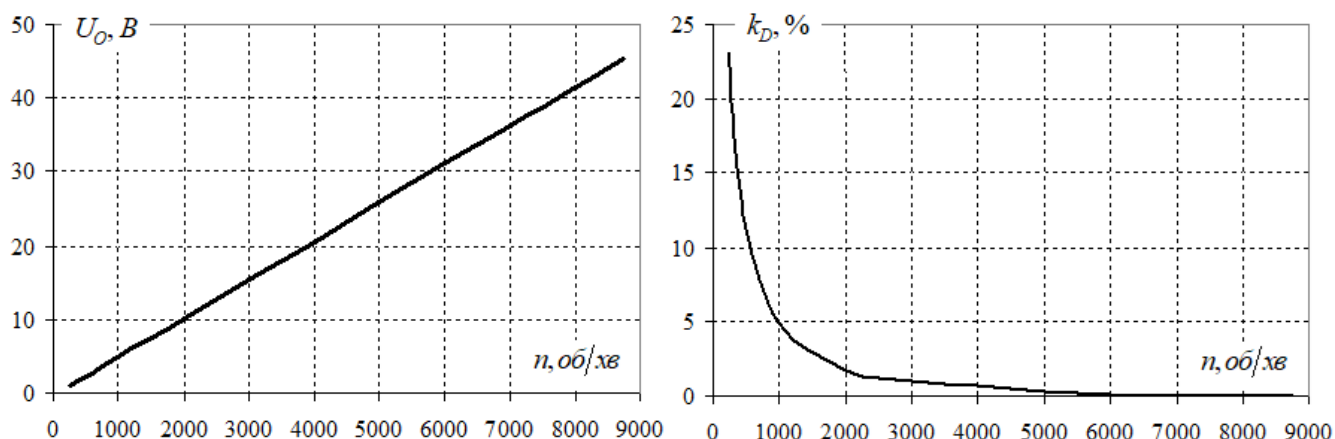


Рис. 8. Експериментальні залежності БМТ з другим варіантом схеми та вихідним транзисторним інвертором

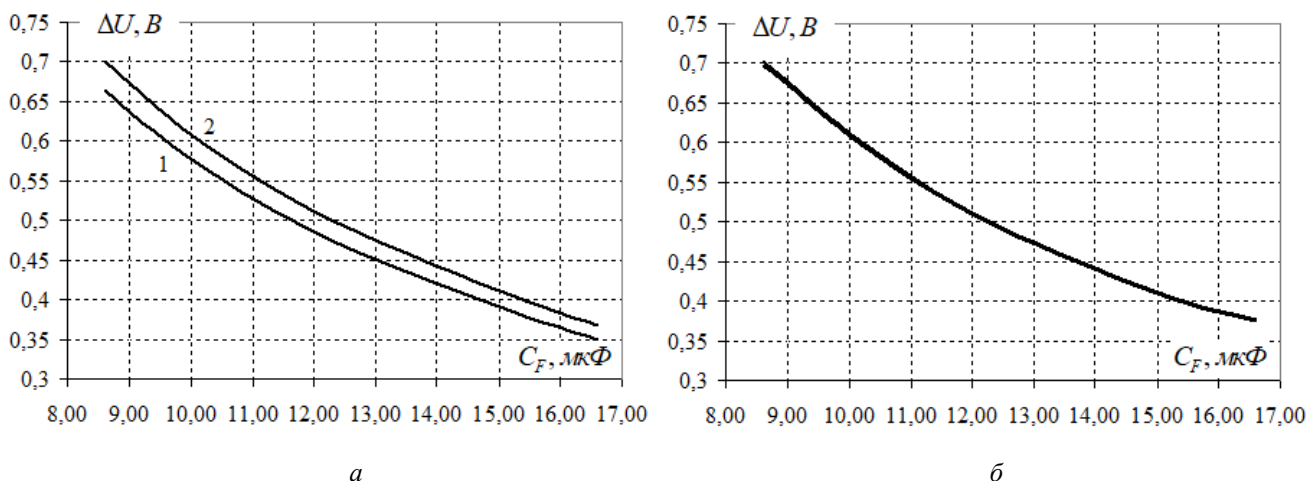


Рис. 9. Залежності розмаху  $\Delta U$  пульсацій вихідного сигналу напруги від величини ємності фільтруючого конденсатора  $C_F$



На рис. 9 показані залежності розмаху  $\Delta U$  пульсацій вихідного сигналу напруги від величини ємності фільтруючого конденсатора  $C_F$ . На рис. 9 а показані залежності для схем 1 і 2, позначені відповідно тими самими цифрами, а на рис. 9 б – характеристики схем 3 і 4, які виявилися дуже близькими за значеннями, що пояснюється тим, що MOSFET мають двосторонню провідність.

**Висновки.** Діодний випрямляч є найпростішим варіантом випрямлення змінних ЕРС статора, оскільки при цьому не потрібно використання датчика положення ротора. Однак вихідна характеристика такого БМТ має зміщення через падіння напруги на діодах. Крім того, внаслідок того, що діодний випрямляч характеризується односторонньою провідністю, стала часу фільтра має різні значення при збільшенні та зменшенні кутової швидкості.

На відміну від діодів, MOSFET мають відносно мале падіння напруги і характеризуються двосторонньою провідністю струму, тому стала часу БМТ незмінна при збільшенні або зменшенні кутової швидкості. При цьому схема БМТ на основі MOSFET складніша за перший варіант випрямляча, оскільки для комутації транзисторів необхідні сигнали датчика положення ротора. У схемі з транзисторним випрямлячем можливе формування вихідної характеристики в усьому діапазоні зміни швидкості обертання ротора тахогенератора, що дозволяє використовувати такий тахогенератор в слідкуючих системах відпрацювання кута повороту.

При живленні системи управління інвертором вихідного сигналу тахогенератора від фазних ЕРС статора виявляється неможливим формування такого сигналу при малих значеннях швидкостей внаслідок недостатнього рівня напруги. При реалізації інвертора на біполярних транзисторах у схемі з діодним випрямлячем неможливо отримати вихідний сигнал напруги в діапазоні дуже малих швидкостей обертання менше 200 об/хв (рис. 7, 8). А це обмежує сферу використання таких БМТ у системах зі зворотними зв'язками.

Щодо властивостей  $RC$ -фільтрів на основі  $R_{F11}$ ,  $R_{F12}$ ,  $R_{F13}$ ,  $R_{F2}$  та  $C_F$  або  $R_{F2}$  та  $C_F$ , то для схеми з транзисторним випрямлячем ці два фільтри є рівноцінними (рис. 9 б) внаслідок двосторонньої провідності, а для схеми з діодним випрямлячем вони мають дещо різні характеристики внаслідок нелінійності діодів (рис. 9 а).

У подальшому передбачається дослідження впливу форми ЕРС статора на розмах пульсацій вихідного сигналу напруги. Крім того, передбачається дослідження можливостей побудови БМТ аксіальної конструкції.

*Фінансується за держбюджетною темою «Розробити наукові засади та принципи побудови керованих н-степеневих магнітоелектричних систем з екстремальними характеристиками» (шифр «Екстремум»), що виконується за Постановою Бюро ВФТПЕ 29.06.2021 р. (Протокол №8). Державний реєстраційний номер роботи 0122U001808. КПКВК 6541030.*

1. Kumar, Ashish; Saraf, Harsh; Kumar, Ravi. Hardware design of closed loop four quadrant dc motor drive with regenerative braking. *2nd International Conference on Inventive Systems and Control (ICISC)*. IEEE, 2018. Pp. 287–292. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICISC.2018.8399080>
2. Худяев А.А., Литвиненко Д.Г. Сравнительная оценка качества итерационных трехканальных следящих электроприводов с типовой настройкой. *Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ"*. Темат. вып. Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. Харьков : НТУ "ХПИ", 2010. № 28. С. 186–191.
3. Ye Zhengmao; Mohamadian Habib P. Comparisons of Two Feedback Servo Systems for Control Engineering Education: A Case Study on Student Performance of Speed Control Systems. *ASEE Gulf-Southwest Annual Conference*. The University of New Mexico: 2008.
4. Top A., Çakmak O., & Gökbülüt M. Tachogenerator DC motor speed control with PID and fuzzy logic. *Journal of Engineering and Technology*. 2017. No 1(1). Pp. 24–31.
5. Справочник по электрическим машинам: В 2 т. Т.2. М.: Энергоатомиздат, 1989. 688 с.
6. Sekine, Hideomi, et al. A compensation method of ripple voltage on DC tachogenerator. *Electrical engineering in Japan*, 1992. 112.2. Pp. 124–131.
7. Електронний ресурс. URL: <https://www.electromate.com/>
8. Corbett A. E. An axial airgap brushless DC tachogenerator. *IEE Colloquium on Instrumentation of Rotating Electrical Machines*. IET, 1991. Pp. 3/1–3/3.
9. Бродовский В.Н., Каржавов Б.Н., Рыбкин Ю.П. Бесколлекторные тахогенераторы постоянного тока. Под ред. В.Н. Бродовского. Москва: Энергоиздат, 1982.

10. Лебедев Н.И., Гандшу В.М., Беляева С.А., Явдошак Я.И. Исследование бесконтактных тахогенераторов для электроприводов станков и роботов. Бесколлекторные электродвигатели с полупроводниковыми устройствами. Ленинград: ВНИИЭлектромаш, 1985. С. 102–115.
11. Kireyev V.G., Akinin K.P. Features of the development of slotless brushless magnetolectric torque motors. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2022. Вип. 63. С. 31–39. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2022.63.031>
12. Петухов І.С., Кіреєв В.Г., Акінін К.П., Лавріненко В.А. Зниження пульсацій обертового моменту безпозового моментного двигуна з постійними магнітами шляхом використання двошарової обмотки. *Технічна електродинаміка*. 2024. № 4. С. 57–62.
13. Подольцев О.Д., Павлов В.Б., Западничук О.П. Анализ эффективности передачи электрической энергии в системе бездротовой зарядки аккумуляторной батареи электромобиля. *Технічна електродинаміка*. 2021. № 4. С. 63–69. DOI: <https://doi.org/10.15407/techmed2021.04.063>.

## EXPERIMENTAL STUDIES OF BRUSHLESS MAGNETOELECTRIC TACHOGENERATORS

**K.P. Akinin, V.G. Kireyev, I.S. Petukhov, A.A. Filomenko**

Institute of Electrodynamics, National Academy of Sciences of Ukraine,  
Beresteiskiy ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine

*The paper is devoted to the study of the characteristics and operating modes of a brushless magneto-electric tachogenerator, which is implemented on the basis of a traditional radial electric machine with a slotless stator and permanent magnets on the rotor. Options for generating an DC output signal using diode and transistor rectifiers have been studied. The dependences of the average value of the output signal, the slope of the output signal, the coefficient of deviation of the characteristic from the specified value and the pulsation coefficient were obtained depending on the rotation speed of the rotor shaft. The influence of the capacitance of the filter capacitor on the magnitude of the output signal ripple amplitude has been studied. Ref. 13, fig. 9, table.*

**Key words:** DC tachometer generator, electric brushless machine with permanent magnets, rectifier.

1. Kumar, Ashish; Saraf, Harsh; Kumar, Ravi. Hardware design of closed loop four quadrant dc motor drive with regenerative braking. *2nd International Conference on Inventive Systems and Control (ICISC)*. IEEE, 2018. Pp. 287–292. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICISC.2018.8399080>
2. Khudyaev A.A., Litvinenko D.G. Comparative assessment of the quality of iterative three-channel servo electric drives with standard settings. *Bulletin of the National tech. University KhPI. Problems of automated electric drive. Theory and practice*. Kharkov: NTU KhPI, 2010. No. 28. Pp. 186–191. (Rus)
3. Ye Zhengmao; Mohamadian Habib P. Comparisons of Two Feedback Servo Systems for Control Engineering Education: A Case Study on Student Performance of Speed Control Systems. *ASEE Gulf-Southwest Annual Conference*. The University of New Mexico: 2008.
4. Top A., Çakmak O., & Gökbulut M. Tachogenerator DC motor speed control with PID and fuzzy logic. *Journal of Engineering and Technology*. 2017. No 1(1). Pp. 24–31.
5. Handbook of Electrical Machines: 2 vols. T.2. Under general ed. I.P. Kopylova, B.K. Klokova. M.: Energoatomizdat, 1989. 688 p. (Rus)
6. Sekine, Hideomi, et al. A compensation method of ripple voltage on DC tachogenerator. *Electrical engineering in Japan*, 1992. 112.2. Pp. 124–131.
7. Web resource. URL: <https://www.electromate.com/>
8. Corbett A. E. An axial airgap brushless DC tachogenerator. *IEE Colloquium on Instrumentation of Rotating Electrical Machines*. IET, 1991. Pp. 3/1–3/3.
9. Brodovsky V.N., Karzhavov B.N., Rybkin Yu.P. Brushless DC tachogenerators. Moscow: Energoizdat, 1982. (Rus)
10. Lebedev N.I., Gandshu V.M., Belyaeva S.A., Yavdoshak Ya.I. Research of contactless tachogenerators for electric drives of machine tools and robots. Brushless electric motors with semiconductor devices. Ленинград: ВНИИЭлектромаш, 1985. Pp. 102–115. (Rus)
11. Kireyev V.G., Akinin K.P. Features of the development of slotless brushless magnetolectric torque motors. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky NAN Ukrainy*. 2022. Issue 63. Pp.31–39. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2022.63.031>
12. Petukhov I.S., Kireev V.G., Akinin K.P., Lavrinenko V.A. Reducing the pulsation of the over-torque torque of a slotless torque motor with permanent magnets and a double-ball winding. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2024. No. 4. Pp. 57–62. (Ukr)
13. Podoltsev O.D., Pavlov V.B., Zapadnichuk O.P. Analysis of the efficiency of electrical energy transmission in the drone-free charging system of an electric vehicle battery. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2021. Issue 4. Pp. 63–69. DOI: <https://doi.org/10.15407/techmed2021.04.063> (Ukr)

Надійшла: 23.07.2024

Прийнята: 09.08.2024

Submitted: 23.07.2024

Accepted: 09.08.2024