

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ "ЗАПОРІЗЬКА ПОЛІТЕХНІКА"

---



*Науковий журнал*

# ЕЛЕКТРОТЕХНІКА та ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА

№3'2022

*Засновано національним університетом "Запорізька політехніка"  
у травні 1999 року*

*Виходить 4 рази на рік*

Запоріжжя

2022

Головний редактор д-р техн. наук  
Яримбаш Д.С.  
Заст. гол. редактора д-р техн. наук  
Тиховод С.М.  
Відповідальний канд. техн. наук  
секретар Коцур М. І.

ЗАКОРДОННІ ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ  
КОЛЕГІЇ

**Yunus Biçen**, Ph.D, університет Дюздже, Туреччина;  
**Zgraja Jerzy**, Ph.D, професор Лодзького технологічного університету, Лодзь, Польща;  
**Biro, Oszkar**, Ph.D, професор інституту основ і теорії електротехніки Грацького технічного, Грац, Австрія;  
**Zurek Stan**, Ph.D., науковий співробітник, Кардіфський університет, Кардіф, Великобританія;  
**Sebastian Tomy**, Ph.D, професор університету Торонто, м. Торонто, Канада, технічний експерт корпорації "Motor Drives and Control Group", Бей-Сіті, Мічиган, США;  
**Arturi, Cesare Mario**, Ph.D., професор політехнічного університету Мілана, Італія;  
**Ronseero-Clemente Carlos**, Ph.D., професор факультету Електроенергетика та електронні системи, Університет Естремадури, м. Бадахос, Іспанія;  
**José Roberto Camacho**, PhD, професор електротехніки в Uberlandia федеральний університет, Бразилія;  
**Mohamed Ahmed Moustafa Hassan**, Ph.D., професор кафедри електротехніки та електроенергетики, Каїрський університет, Гіза, Єгипет.

Включено до переліку  
наукових фахових видань України  
(наказ МОНУ № 409 від 17.03.2020 р.,  
наказ МОНУ № 1471 від 26.11.2020 р.)

ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ (Україна)

**Загірняк М. В.**, д-р техн. наук, проф., Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, м. Кременчук, Україна;  
**Зірка С. Є.**, д-р техн. наук, проф., Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, м. Дніпро, Україна; **Мілих В. І.**, д-р техн. наук, проф., Національний технічний університет «ХПІ», м. Харків, Україна; **Жильцов А. В.**, д-р техн. наук, проф., Національний університету біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна; **Паранчук Я. С.**, д-р техн. наук, проф., Національний університет "Львівська політехніка", м. Львів, Україна; **Толочко О. І.**, д-р техн. наук, проф., Київський політехнічний інститут імені І. Сікорського", м. Київ, Україна; **Бушер В. В.**, д-р техн. наук, проф., Одеський національного політехнічного університету, м. Одеса, Україна; **Андрієнко П. Д.**, д-р техн. наук, проф., НУ «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна; **Зіновкін В. В.**, д-р техн. наук, проф., НУ «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна; **Мороз Ю. І.**, канд. техн. наук, доц., Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, м. Дніпро, Україна; **Коцур І. М.**, канд. техн. наук, доц., НУ «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна; **Яримбаш С. Т.**, канд. техн. наук, доц., НУ «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна; **Шило Г. М.**, д-р техн. наук, доц., НУ «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна; **Фурманова Н. І.**, канд. техн. наук, доц., НУ «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна; **Пархоменко А. В.**, канд. техн. наук, доц., НУ «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна; **Щербовських С. В.**, д-р техн. наук, доц., Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна; **Мартинюк В. В.**, д-р техн. наук, проф., Хмельницький національний університет, м. Хмельницький, Україна; **Кочан В. В.**, канд. техн. наук, доц., Тернопільський національний економічний університет, м. Тернопіль, Україна; **Глоба Л. С.**, д-р техн. наук, проф., Національний технічний університет України «КПІ ім. Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна; **Скулиш М. А.**, канд. техн. наук, с.н.с., Національний технічний університет України «КПІ ім. Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна; **Назарова О.С.**, канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна; **Безверхня Ю.С.**, доктор філософії, ст. викладач НУ «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна.

*Журнал включено до міжнародних наукометричних баз, каталогів та систем пошуку: Index Copernicus, CrossRef; Directory of Open Access Journals (DOAJ); OpenAIRE; Public Knowledge Project (PKP); ResearchBib - Academic Resource Index; Scientific Indexing Services (SIS); Ulrich's Periodicals Directory; WorldCat; КіберЛенінка; Наукова періодика України – проект Національної бібліотеки України імені В. І. Вернадського (НБУВ).*

У науковому журналі друкуються результати фундаментальних та прикладних досліджень, зокрема результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата технічних наук у галузі електротехніки та електроенергетики у відповідності з рубриками: 1. Електротехніка; 2. Електроенергетика; 3. Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології.

Журнал розповсюджується за Каталогом періодичних видань України (передплатний індекс – 22913)

Видавець: Національний університет "Запорізька політехніка", м. Запоріжжя. Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК №6952 від 22.10.2019р.  
Реєстрація журналу: Журнал зареєстровано у Міністерстві юстиції України. Свідоцтво про державну реєстрацію КВ №24219-14059 ПР від 07.11.2019р.  
Адреса редакції: Редакційно-видавничий відділ національного університету "Запорізька політехніка", вул. Жуковського, 64, м. Запоріжжя, 69063, Україна. Телефон: +380(61)769-82-96 Факс: (061) 764-21-41 e-mail: rrvv@zntu.edu.ua  
Електронна адреса журналу <http://ee.zntu.edu.ua> E-mail: etae@ukr.net

Комп'ютерна верстка Дяченко О.О. Редактор англійських текстів Войтенко С.В. Журнал підписано до друку 07.06.2022 за рекомендацією вченої ради національного університету "Запорізька політехніка" (протокол №2 від 26.09.2022 р.). Формат 60x84/8. Ум. Др. Арк. 2,56. Тираж 300 прим. Зам. №716.

ZAPORIZHZHIA POLYTECHNIC NATIONAL UNIVERSITY

---



*Scientific journal*

# **ELECTRICAL ENGINEERING & POWER ENGINEERING**

**№3'2022**

*Founded by Zaporizhzhia Polytechnic National University in May 1999*

*4 issues per year*

Zaporizhzhia

2022

*Editor-in-chief* Prof., Sc.D.  
Dmytro Yarymbash  
*Associate Editor-in-chief* Assoc. prof., Sci.D.,  
Sergiy Tihovod  
*Senior secretary* Assoc. prof., Ph.D.  
Mikhailo Kotsur

*The journal has been included  
scientific professional editions of Ukraine  
(Order of the Ministry of Education and Science  
№ 409 dated 17.03.2020,  
Order of the Ministry of Education and Science  
№ 1471 dated 26.11.2020)*

FOREIGN MEMBERS OF EDITORIAL BOARD

**Yunus Biçen**, Ph.D. Duzce University, Turkey;  
**Prof. Jerzy Zgraja**, Ph.D., Lodz University of  
Technology, Lodz, Poland;  
**Prof. Oszkár Bíró**, Ph.D., Technical University of Graz,  
Graz, Austria;  
**Zurek, Stan**, Ph.D., Research Associate, Cardiff  
University, Cardiff, United Kingdom;  
**Sebastian Tomy**, Ph.D, Toronto University, Canada,  
(Technical Expert, Motor Drives and Control Group, Bay  
City, Michigan, USA);  
**Arturi Cesare Mario**, PhD., Prof., Polytechnic  
University of Milan, Italy;  
**Carlos Roncero-Clemente**, Ph.D., Prof., Universidad de  
Extremadura, Badajoz, Spain;  
**José Roberto Camacho PhD**, Prof., Universidade  
Federal de Uberlandia, Brazil;  
**Mohamed Ahmed Moustafa Hassan**, Ph.D., Prof.,  
Cairo University, Giza, Egypt.

MEMBERS OF EDITORIAL BOARD (Ukraine)

**M.V. Zagirnyak**, Sc.D., prof., Kremenchuk Michaylo Ostrogradskiy  
National University; **S. E Zirka**, Sc.D., prof., Oles Honchar Dnipro  
National University, Dnipro, Ukraine; **V. I. Milykh**, Sc.D., prof.,  
National Technical University "KhPI", Kharkiv, Ukraine; **A. V.  
Zhytsov**, Sc.D., prof., National University of Life and  
Environmental Sciences of Ukraine; **Ya. S. Paranchuk**, Sc.D., prof.,  
Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine; **O. I.  
Tolochko**, Sc.D. prof., Kyiv Polytechnic National Technical  
University, Kiev, Ukraine; **V. V. Busher**, Sc.D., prof., Odesa  
National Polytechnic University, Odesa, Ukraine; **P. D. Andrienko**,  
Sc.D., prof., Zaporizhzhia Polytechnic National University,  
Zaporizhzhia, Ukraine; **V.V. Zinovkin**, Sc.D., prof., Zaporizhzhia  
Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine; **Yu I.  
Moroz**, Ph.D., assoc. prof., Oles Honchar Dnipro National  
University, Dnipro, Ukraine; **I. M. Kotsur**, Ph.D, assoc. prof.,  
Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia,  
Ukraine; **S. T. Yarymbash**, Ph.D, assoc. prof., Zaporizhzhia  
Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine; **G. M.  
Shilo**, Sci.D., assoc. prof., Zaporizhzhia Polytechnic National  
University, Zaporizhzhia, Ukraine; **N. I. Furmanova**, Ph.D., assoc.  
prof., Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia,  
Ukraine; **A. V. Parkhomenko**, Ph.D., assoc. prof., Zaporizhzhia  
Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine; **S. V.  
Shcherbovskykh**, Sc.D., assoc. prof., Lviv Polytechnic National  
University, Lviv, Ukraine; **V. V. Martynyuk**, Sc.D., prof.,  
Khmelnitsky National University, Khmelnytsky, Ukraine; **V. V.  
Kochan**, Ph.D., assoc. prof., Ternopil National Economic  
University, Ternopil, Ukraine; **L. S. Globa**, Sc.D. prof., Kyiv  
Polytechnic National Technical University, Kyiv, Ukraine; **M. A.  
Skulish**, Ph.D., assoc. prof., Kyiv Polytechnic National Technical  
University, Kyiv, Ukraine; **O.S. Nazarova**, Ph.D., assoc. prof.,  
Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia,  
Ukraine; **Yu.S. Bezverkhnia**, Ph.D., Senior Lecturer, Zaporizhzhia  
Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine.

*The journal included in the international scientometric databases, catalogs and search systems: Index Copernicus; CrossRef; Directory of Open Access Journals (DOAJ); Google Academy; OpenAIRE; Public Knowledge Project (PKP); ResearchBib - Academic Recourse Index; Scientific Indexing Services (SIS); Ulrich's Periodicals Directory; WorldCat; CyberLeninka; Scientific Periodicals of Ukraine — the project of the National Library of Ukraine named V.I. Vernadsky (NBUV).*

The scientific journal publishes the results of fundamental and applied research, in particular the results of dissertation papers for obtaining the scientific degrees of a Sci.D. and a Ph.D. of technical sciences in the field of electrical engineering and electrical engineering in accordance with the headings: 1. Electrical engineering; 2. Power engineering; 3. Automation and computer integrated technologies.

The journal is distributed by the Catalog of periodicals of Ukraine (subscription index – 22913)

Founder and editor: Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia. Certificate of publisher Civil Code №6952 dated October 22, 2019.

Journal was registered: by the Ministry of Justice of Ukraine. Registration number KV № 24219-14059 PR dated November 7, 2019.  
Address of editor and editorial office: Zaporizhzhia Polytechnic National University, st. Zhukovsky, 64, Zaporozhia, 69063, Ukraine. Phone: +380(61)769-82-96 Fax: (061) 764-21-41 e-mail: rvv@zntu.edu.ua.

**E-address:** <http://ee.zntu.edu.ua>; **E-mail:** [etae@ukr.net](mailto:etae@ukr.net)

Computer layout Dyachenko O.O. Editor of English texts Voitenko S.V. The journal was signed on June 07, 2022 on the recommendation of the academic council of the Zaporizhzhia Polytechnic National University (Protocol No.2 dated september 26, 2022). Sheet size 60x84/8. Cond. Print. Sheets 2,56. Number of copies printed 300. Rep. №716.

# ЗМІСТ

## I ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

*Прокуда В.М., Рухлова Н.Ю.*

Розробка моделі врахування збільшення активного опору провідника змінному струмі при поверхневому ефекті .....7

*Калиніченко Д.В.*

Збільшення відмовостійкості резонансних установок індукційного нагріву під час аварійного режиму роботи.....15

## II ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА

*Качан Ю.Г., Шрам О.А., Свергун А.В.*

Можливості зменшення впливу ЧРП на якість електроенергії в мережах підприємств та вартості його використання.....26

# CONTENTS

## I ELECTRICAL ENGINEERING

***Prokuda V.M., Rukhlova N.Yu.***

Model development according to increase in the active resistance of the conductor to ac current at the surface effect.....7

***Kalynichenko D.V.***

Increase of failure resistance of resonant induction heating installations during emergency operation .....15

## II POWER ENGINEERING

***Kachan YU.G., Shram O.A., Sverhun A.V.***

Possibilities to reduce the impact of vfd on the quality of electric power in the networks of enterprises and the cost of its use.....26

УДК 621.316.13

## РОЗРОБКА МОДЕЛІ ВРАХУВАННЯ ЗБІЛЬШЕННЯ АКТИВНОГО ОПОРУ ПРОВІДНИКА ЗМІННОМУ СТРУМІ ПРИ ПОВЕРХНЕВОМУ ЕФЕКТІ

ПРОКУДА В.М. канд. техн. наук, асистент кафедри електроенергетики Національного ТУ «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна, e-mail: prokuda.v.m@nmu.one;  
РУХЛОВА Н.Ю. канд. техн. наук, доцент кафедри електроенергетики Національного ТУ "Дніпровська політехніка", м. Дніпро, Україна, e-mail: Rukhlova.N.Yu@nmu.one;

**Мета роботи.** При проходженні змінного струму з вищими гармоніками по кабелю нагрівання здійснюється середньоквадратичним значенням всіх гармонік. Зважаючи на різний опір кабелю в залежності від частоти через дію поверхневого ефекту, доцільно розраховувати коефіцієнт підвищення опору повному струму, приймаючи дію кожної гармоніки незалежною. Однак, є передумови вважати існуючі розрахункові моделі складними для алгоритмічної реалізації у програмних пакетах. Тому метою роботи є розробка розрахункової моделі для врахування збільшення активного опору провідника змінному струму при поверхневому ефекті для подальшого використання у пакетах імітаційного моделювання таких як, наприклад, MATLAB.

**Методи дослідження.** Методи лінійної алгебри, лінійної регресії, визначення коефіцієнта детермінації.

**Отримані результати.** Отримано залежності для визначення величини опору високовольтних кабельних ліній струмам високої частоти, котрі враховують переріз та гармонійний склад струму. За існуючими та обґрунтованими графіками (залежностями), отриманими на підставі класичних виразів з літератури, були отримані нові спрощені розрахункові залежності (для перерізу мідних кабельних ліній 240 - 1000 мм<sup>2</sup>) при протіканні гармонік струму вище п'ятої при базовій частоті 50 Гц. Такі розрахункові співвідношення дозволяють здійснювати у програмному середовищі MATLAB Simulink врахування декількох гармонійних складових струму при нагріванні лінії.

Отримані значення коефіцієнта детермінації при визначенні розрахункових залежностей близькі до 1, що говорить про правильно обраний вид рівняння і правильно підібраний коефіцієнт  $k$  для різних перерізів кабельної лінії.

**Наукова новизна.** Наукова новизна полягає у розробці нової залежності, котра обґрунтована високим значенням множинного коефіцієнту кореляції, поправочного коефіцієнту збільшення опору жили кабелю від номеру гармоніки та емпіричного коефіцієнту регресійної моделі, котрий враховує переріз кабельної лінії.

**Практична цінність.** Практична цінність роботи полягає у отриманні залежностей, котрі можливо використовувати у аналітичних та імітаційних моделях при визначенні величини нагріву кабельних ліній з урахуванням струму гармонік вище п'ятої при базовій частоті 50 Гц. Таке застосування дозволить у багатьох випадках замінити фізичний експеримент імітаційним у програмному середовищі MATLAB Simulink, що зменшить необхідні людські та матеріальні витрати.

**Ключові слова:** кабельна лінія; нагрів; вищі гармоніки; регресія; коефіцієнт детермінації; MATLAB Simulink; активний опір; поверхневий ефект.

### I. ВСТУП

У зв'язку зі збільшенням кількості електричних приладів та електроспоживачів з нелінійним навантаженням зростає актуальність розробки способів визначення допустимих струмів кабельних ліній при різному гармонічному складі струму. Як відомо, збільшення нагріву кабелю відбувається через збільшення середньоквадратичної складової гармонік, а також зростаючого впливу поверхневого ефекту. Також все ширше використання знаходять кабельні лінії перерізом 240 – 1000 мм<sup>2</sup> на напругу 6-35 кВ. Але є передумови вважати дещо складними існуючі моделі врахування поверхневого ефекту для практичного застосування.

### II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Основні засади визначення нагріву кабельних ліній струмами вищих гармонік викладено у [1-3]. При протіканні по кабелю змінного струму з вищими гармоніками нагрів здійснюється середньоквадратичним їх значенням. Однак, з огляду на різний опір кабелю в залежності від частоти струму через дію поверхневого ефекту, доцільно розраховувати коефіцієнт підвищення опору повному струму, приймаючи вплив кожної гармоніки незалежно [4], тобто:

$$\Delta P_{ac} = I^2 R_{ac} = I_1^2 R_1 + \sum_{\substack{n=2k-1, \\ n \neq 3k, k \in N}}^m I_n^2 R_n \quad (1)$$

де  $n$  – номер гармоніки,  $m$  – максимальний номер гармонік, прийнятих для аналізу. Згідно літератури [2], суттєвий вплив надають гармоніки до  $m = 23$ .  $I_n$  та  $R_n$  – струм та опір струму  $n$ -ої гармоніки.

Визначимо величину струму вищих гармонік у відсотках відносно струму основної частоти і позначимо це значення коефіцієнтом  $K_{In}$ . Аналогічно для опору використовуємо коефіцієнт  $K_{Rn}$ . Перепишемо вираз (1), використовуючи коефіцієнти  $K_{Rn}$  и  $K_{In}$ :

$$\Delta P_{ac} = I^2 R_{ac} = I_1^2 R_1 \left( 1 + \sum_{\substack{n=2k-1, \\ n=3k, k \in N}}^m (K_{In})^2 K_{Rn} \right) \quad (2)$$

Згідно літератури [3]  $K_{Rn}$  визначається як:

$$K_{Rn} = (1 + y_s + y_p) \quad (3)$$

де:

$y_s$  – фактор поверхневого ефекту;

$y_p$  – фактор ефекту близькості.

Фактор поверхневого ефекту розраховується як:

$$y_s = \frac{x_s^4}{192 + 0.8 \cdot x_s^4}, \quad (4)$$

де:

$$x_s = \sqrt{\left( \frac{8\pi f}{R_{dc}} 10^{-7} \cdot k_s \right)}, \quad (5)$$

$R_{dc}$  – опір постійному струму при робочій температурі провідника  $\theta$  (Ом/м),

$f$  – частота мережі (Гц),

$k_s$  – константа.

Фактор ефекту близькості кабелю залежить від геометрії провідника. У разі круглого провідника коефіцієнт впливу близькості дорівнює.

$$y_p = \frac{x_p^4}{192 + 0.8 \cdot x_p^4} \left( \frac{d_c}{s} \right)^2 \cdot 2.9, \quad (6)$$

де:

$$x_p = \sqrt{\left( \frac{8\pi f}{R_{dc}} 10^{-7} \cdot k_p \right)}, \quad (7)$$

$R_{dc}$  – опір постійному струму при робочій температурі провідника  $\theta$  (Ом/м)

$f$  – частота мережі (Гц);

$k_p$  – константа;

$s$  – відстань між вісями провідників (мм);

$d_c$  – діаметр провідника (мм).

Коефіцієнт  $K_{In}$  має задаватися для кожної гармоніки окремо, він обумовлений несинусоїдальною прикладеною напругою, а також нелінійним опором навантаження.

Однак, вирази (3) – (7) мають певні недоліки:

1. Вони громіздкі при необхідності розрахунку впливу декількох гармонійних складових одночасно.

2. В літературі [5] йде мова про обмежену галузь застосування виразів, а саме їх адекватності лише при частотах 50-250 Гц для перерізів лінії 240 мм<sup>2</sup> та більше. Тому доцільно розробити інший підхід для подальшої розробки моделі в середовищі MATLAB.

Опір провідника з поверхневим ефектом згідно класичних праць Безсонова Л.А. [6] визначається за виразом:

$$R_{жс} = \frac{\sqrt{\omega \mu b_0}}{2\pi \gamma b_1 a} \cos(\beta_0 - \beta_1 - 45), \quad (8)$$

де  $\omega$  – кутова частота електричного струму;  $b_0$  – модуль функції Бесселя нульового порядку першого роду;  $b_1$  – модуль функції Бесселя першого порядку першого роду;  $\beta_0$  – аргумент функції Бесселя нульового порядку першого роду;  $\beta_1$  – аргумент функції Бесселя першого порядку першого роду;  $\gamma$  – питома провідність струмопровідної жили;  $\mu$  – магнітна проникність;  $a$  – радіус струмопровідної жили.

### III. МЕТА РОБОТИ

При проходженні змінного струму з вищими гармоніками по кабелю нагрівання здійснюється середньоквадратичним значенням всіх гармонік. Зважаючи на різний опір кабелю в залежності від частоти через дію поверхневого ефекту, доцільно розраховувати коефіцієнт підвищення опору повному струму, приймаючи дію кожної гармоніки незалежною. Однак, є передумови вважати існуючі розрахункові моделі складними для алгоритмічної реалізації у програмних пакетах. Тому метою роботи є розробка розрахункової моделі для врахування збільшення активного опору провідника змінному струму при поверхневому ефекті для подальшого використання у пакетах імітаційного моделювання таких як, наприклад, MATLAB.

### IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ І АНАЛІЗ ОТРИМАННИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

В літературі [5] за виразом (8) побудовано залежності відносного збільшення опору мідної струмопровідної жили при різному перерізі. Наведемо їх на рисунку 1.

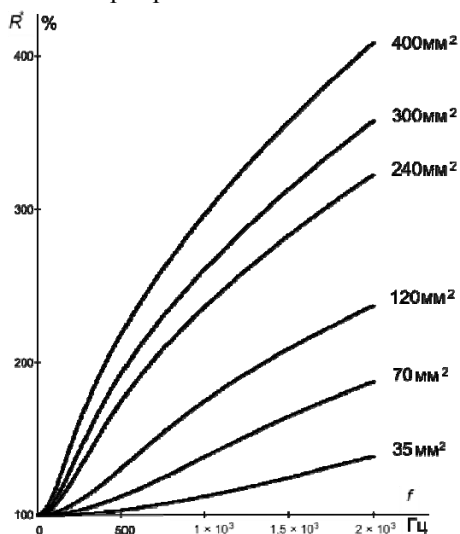
У представленому вигляді вираз (8) складно аналітично використовувати в моделях для аналізу нагріву ізоляції кабельних ліній. Тому доцільно виконати апроксимацію залежностей для окремих випадків – кабельних ліній перерізом 240 – 1000 мм<sup>2</sup> та гармонік вище 5-ої.

Апроксимацію виконаємо в програмному пакеті Microsoft Excel. Згідно літератури [5] високу точність наближення дає вираз:



$$K_{Rn} = (0,187 + 0,532 \cdot \sqrt{n}), \quad (9) \quad \text{перерізі}$$

де  $n$  – номер гармоніки.



Однак, таке наближення адекватно тільки для перерізу  $300 \text{ мм}^2$ , для інших перерізів (виходячи з візуальної оцінки) необхідно ввести уточнюючий коефіцієнт  $k$ :

$$K_{Rn} = k(0,187 + 0,532 \cdot \sqrt{n}), \quad (10)$$

Виконаємо підбір коефіцієнта  $k$  для апроксимації існуючих наведених в літературі [5] залежностей. На рисунку 2 крива (1) відповідає апроксимації за виразом (10) при  $k=1$  (для  $300 \text{ мм}^2$ ), а крива (2) при  $k = 0,91$  (для  $240 \text{ мм}^2$ ). Аналогічно методом підбору знаходимо коефіцієнти для  $400 \text{ мм}^2 - k=1,14$  і для  $120 \text{ мм}^2 - k=0,67$ . Однак останнє значення використовувати при розрахунках буде не коректно, тому що воно стає близьким до вихідної кривої тільки близько частоти  $500 \text{ Гц}$  (рис 2).

Рисунок 1. Збільшення опору при дії поверхневого ефекту в мідному провіднику при різному його

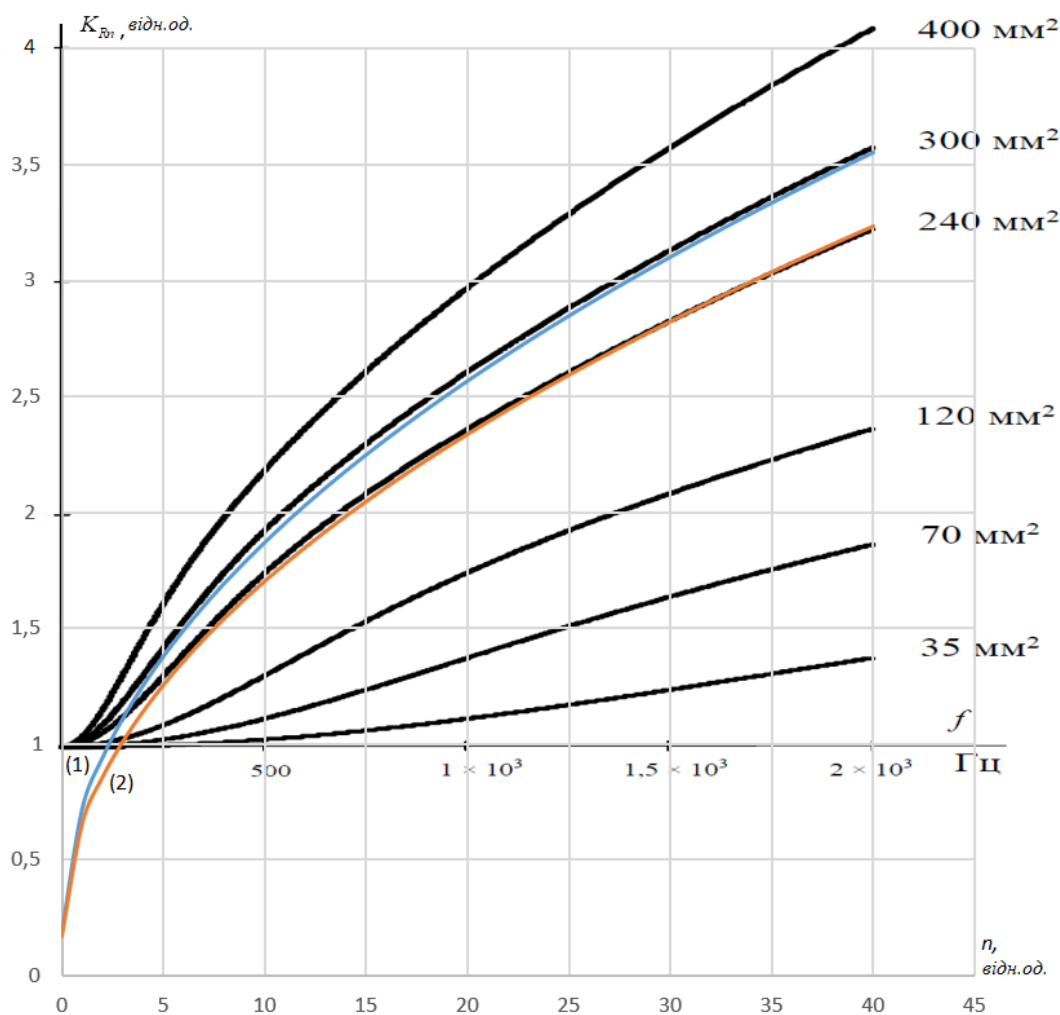


Рисунок 2. Апроксимація кривих для визначення величини активного опору при поверхневу ефекті

На рисунку 2 дві осі абсцис – абсолютне значення частоти в Гц, і відносні значення частоти першої гармоніки 50 Гц – воно ж має назву номер гармоніки  $n$ .

Далі визначимо коефіцієнт  $k$  для перерізів 600 мм<sup>2</sup>, 800 мм<sup>2</sup> і 1000 мм<sup>2</sup>. Для цього виконаємо апроксимацію лінійним рівнянням отриманих коефіцієнтів, після чого здійсимо екстраполяцію. Задаємо вихідні значення (таблиця 1) і будуємо по ним графік (рисунок 3), а також програмними засобами будуємо лінію тренда (апроксимуючу лінію). Показуємо рівняння лінії і точність безпосередньо на графіку.

Таблиця 1. Вихідні дані для апроксимації

Переріз, мм <sup>2</sup>	$k$
400	1,14
300	1
240	0,91
120	0,67



Рисунок 3. Апроксимація коефіцієнта  $k$

Як видно, коефіцієнт детермінації  $R^2 = 0,99$ , що досить точно для вирішення поставлених завдань. Обчислюємо коефіцієнт  $k$  для інших перерізів.

Для 600 мм<sup>2</sup>:

$$k = 0,0017 \cdot 600 + 0,4851 = 1,505$$

Для 800 мм<sup>2</sup>:

$$k = 0,0017 \cdot 800 + 0,4851 = 1,845$$

Для 1000 мм<sup>2</sup>:

$$k = 0,0017 \cdot 1000 + 0,4851 = 2,185$$

Обчислені коефіцієнти  $k$  адекватні для гармонік від 5-ої до 40-ої.

Виконаємо аналіз точності отриманих залежностей використовуючи коефіцієнт детермінації. Вихідні дані для аналізу отримаємо з залежностей на рисунку 1 методом візуальної

обробки в діапазоні 250 – 2000 Гц для перерізів 240, 300 та 400 мм<sup>2</sup>.

Коефіцієнт детермінації розраховується згідно наступних залежностей:

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{reg}}{SS_{tot}} \quad (11)$$

де  $SS_{reg} = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$  – сума квадратів решток регресії,  $y_i$ ,  $\hat{y}_i$  – фактичні і розрахункові значення змінної, котра є в розробці.

$$SS_{tot} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \text{ – загальна сума квадратів}$$

при цьому  $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$  – середнє значення всієї вибірки.

Покажемо приклад розрахунку. Визначаємо середнє значення вибірки для перерізу 240 мм<sup>2</sup>:

$$\bar{y} = \frac{1}{36} \sum_{i=1}^n (1,188 + 1,293 + 1,386 + \dots + 3,232) = 2,385$$

Для  $n = 5$  та перерізу 240 мм<sup>2</sup>:

$$(y_5 - \hat{y}_5)^2 = (1,293 - 1,253)^2 = 0,0025$$

$$(y_5 - \bar{y}_5)^2 = (1,293 - 2,385)^2 = 1,193$$

Визначаємо суми квадратів для перерізу 240 мм<sup>2</sup>:

$$SS_{reg} = \sum_{i=1}^n (0,0025 + 0,0016 + \dots + 0,0001 + 0) = 0,0259$$

$$SS_{tot} = \sum_{i=1}^n (1,432 + 1,193 + 0,998 + \dots + 0,718) = 12,6595$$

Коефіцієнт детермінації:

$$R^2 = 1 - \frac{0,0259}{12,6595} = 0,998$$

Аналогічно отримуємо значення суми квадратів для інших перерізів. Отримані значення  $R^2$  близькі до 1, що говорить про вірно обраний вид рівняння (10) та вірно визначені коефіцієнти  $k$  для різних перерізів кабельної лінії.

Для моделювання дії вищих гармонійних складових струму розробимо розрахункову модель у програмному пакеті MATLAB, частину якої, котра виконує розрахунок згідно рівнянь (2) та (10), представимо на рисунку 4.

Результати моделювання для аналізованих раніше перерізів кабельних ліній наведемо в таблиці 2.

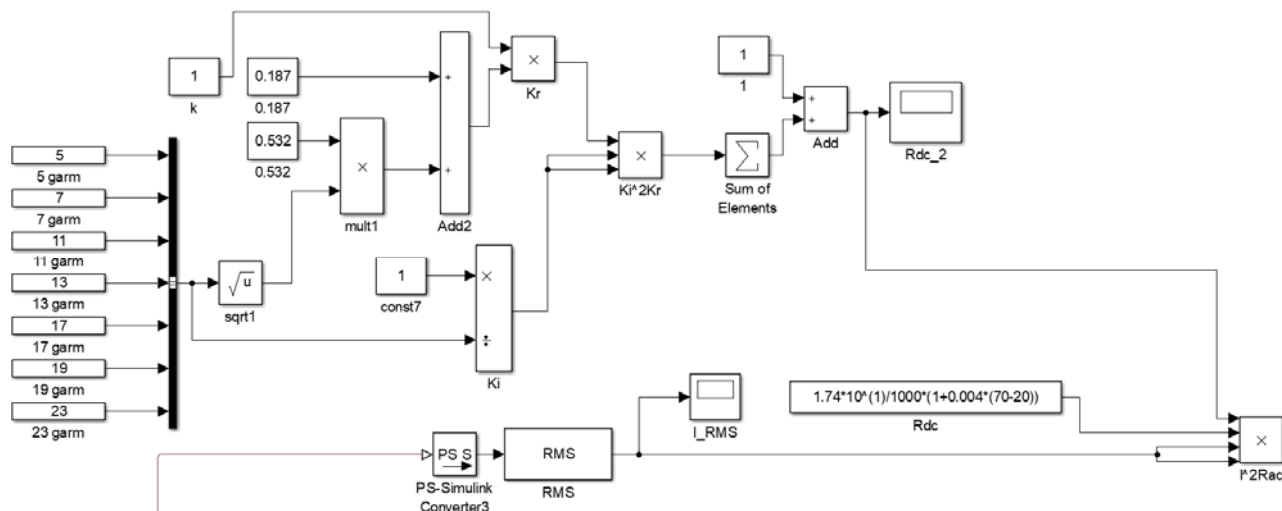


Рисунок 4. Визначення активного опору при дії в кривій струму кількох гармонійних складових

Таблиця 2. Результати моделювання нагріву кабельних ліній при дії струмів вищих гармонік, °С (початкова температура 20 °С)

вищі гармоніки *	Кабельні лінії перерізом, мм <sup>2</sup>					
	240	300	400	600	800	1000
Відсутні.	84,08	84,4	84,62	85,7	86,2	86,8
1/n	90,91	92,18	94,3	98,53	102,77	107

\* струми першої гармоніки приймаються близькими до максимально допустимих за довідковими даними.

За результатами моделювання для кабельних ліній перерізом 240-400 мм<sup>2</sup>, можемо сказати, що нагрів вищими гармоніками істотно менше, ніж у кабелів перетином 1000 мм<sup>2</sup>, особливо при значних гармонійних складових струму більш 20 %.

## V. ВИСНОВКИ

В роботі отримано залежності для визначення величини опору високовольтних кабельних ліній струмам високої частоти, котрі враховують переріз та гармонійний склад струму. За існуючими та обґрунтованими графіками (залежностями), отриманими на підставі класичних виразів з літератури, були отримані нові спрощені розрахункові залежності (для перерізу мідних кабельних ліній 240 - 1000 мм<sup>2</sup>) при протіканні гармонік струму вище п'ятої при базовій частоті 50 Гц. Такі розрахункові співвідношення дозволять здійснювати у програмному середовищі MATLAB Simulink врахування декількох гармонійних складових струму при нагріванні лінії.

Отримані значення коефіцієнта детермінації при визначенні розрахункових залежностей близькі до 1,

що говорить про правильно обраний вид рівняння і правильно підібраний коефіцієнт k для різних перерізів кабельної лінії.

Наукова новизна полягає у розробці нової залежності, котра обґрунтована високим значенням множинного коефіцієнту кореляції, поправочного коефіцієнту збільшення опору жили кабелю від номеру гармоніки та емпіричного коефіцієнту регресійної моделі, котрий враховує переріз кабельної лінії.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Зайцев, Е.С. Алгоритм оценки температур жил трёхфазных высоковольтных кабельных линий с изоляцией из сшитого полиэтилена / Е.С. Зайцев, В.Д. Лебедев // Электрические станции. – 2016. – Вып. 9. – С. 34–38. <http://elst.energy-journals.ru/index.php/elst/article/view/516>
- [2] Tze Mei Kuan, Suhaila Sulaiman, Azrul Mohd. Ariffin, Wan Mohamad Shakir Wan Shamsuddin. Verification of MATLAB/Simulink Power Cable Modelling with Experimental Analysis/ Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science Vol. 11, No. 2, August 2018, pp. 622~629 ISSN: 2502-4752, DOI: 10.11591/ijeecs.v11.i2.pp622-629. [https://www.researchgate.net/publication/325959293\\_Verification\\_of\\_MATLABSimulink\\_Power\\_Cable\\_Modelling\\_with\\_Experimental\\_Analysis/fulltext/5c5378a7a6fdccd6b5d77323/Verification-of-MATLAB-Simulink-Power-Cable-Modelling-with-Experimental-Analysis.pdf?origin=publication\\_detail](https://www.researchgate.net/publication/325959293_Verification_of_MATLABSimulink_Power_Cable_Modelling_with_Experimental_Analysis/fulltext/5c5378a7a6fdccd6b5d77323/Verification-of-MATLAB-Simulink-Power-Cable-Modelling-with-Experimental-Analysis.pdf?origin=publication_detail)
- [3] Ansovinus Akumawah Nche, Temperature modeling and control algorithm for high voltage underground cables, A thesis submitted to the faculty of The University of North Carolina at Charlotte in partial fulfillment of the requirements for the degree of

- Master of Science in Applied Energy and Electromechanical Systems, Charlotte, 2017 – 104 p. <https://repository.uncc.edu/islandora/object/etd%3A1627/datastream/PDF/download/citation.pdf>
- [4] Д. В. Куделина, В. И. Бирюлин. Определение нагрева изоляции кабельных линий с учетом влияния высших гармоник. Auditorium. Электронный научный журнал Курского государственного университета. 2019. № 1 (21). <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-nagreva-izolyatsii-kabelnyh-linij-s-uchetom-vliyaniya-tokov-vysshih-garmonik>
- [5] А. А. Алферов, А. В. Засименко, Т. В. Алферова, Ю. А. Рудченко Анализ существующих инженерных математических моделей учета поверхностного эффекта в токопроводящих жилах силовых кабелей. Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого № 2, 2015 <https://core.ac.uk/download/pdf/212976232.pdf>
- [6] Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники: Электрические цепи. Учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлениям подготовки дипломированных специалистов «Электротехника, электромеханика и электротехнологии», «Электроэнергетика», «Приборостроение». Автор: Лев Алексеевич Бессонов. 11-е издание, переработанное и дополненное. Учебное издание. Внешнее оформление Н.Д. Горбуновой. М: Гардарики, 2007.
- [7] M. Caton, O. Marjanovic and S. Rowland, "Dynamic Thermal Modelling of Low Voltage Underground Cables", *University of Manchester report*, 2015. <https://www.vermilliontesting.co.uk/globalassets/innovation/enwl002-thermal-modelling/enwl002-closedown/enwl002-appendix-2---dynamic-thermal-modelling-of-lv-underground-cables.pdf>
- [8] Aman Sharma, Determination of Hotspot Location and Power Cable Temperatures from Spare Duct Temperatures in an Underground Installation. A Thesis Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Master of Science. Arizona state university, December 2017, - 123 p. [https://repository.asu.edu/attachments/194055/content/Sharma\\_asu\\_0010N\\_17507.pdf](https://repository.asu.edu/attachments/194055/content/Sharma_asu_0010N_17507.pdf)
- [9] Ansovinus Akumawah Nche, Temperature modeling and control algorithm for high voltage underground cables, A thesis submitted to the faculty of The University of North Carolina at Charlotte in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Applied Energy and Electromechanical Systems, Charlotte, 2017 – 104 p. <https://repository.uncc.edu/islandora/object/etd%3A1627/datastream/PDF/download/citation.pdf>
- [10] Simulating Thermal Effects in Semiconductors, <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/ug/simulating-thermal-effects.html#bs5crhn-1>
- [11] Martin Andersson Ljus, Dynamic Line Rating Thermal Line Model and Control. Division of Industrial Electrical Engineering and Automation Faculty of Engineering, Lund University. CODEN:LUTEDX/(TEIE-5324)/1-49/2013, - 55 p. [https://www.iea.lth.se/publications/MS-Theses/Full%20document/5324\\_full\\_document.pdf](https://www.iea.lth.se/publications/MS-Theses/Full%20document/5324_full_document.pdf)
- [12] Кабели силовые для стационарной прокладки. Общие технические условия: ГОСТ 24183–80. М.: Изд-во стандартов, 1989. 33 с.
- [13] ДСТУ EN 50160:2014.. Якість електричної енергії. Опубліковано 06 квітня 2016. року Дата оновлення: 21.02.2022. <https://www.nerc.gov.ua/sferi-diyalnosti/elektroenergiya/yakist-elektropostachannya/yakist-elektrichnoyi-energiyi#:~:text=Показники%20якості%20електричної%20енергії%20для,у%20ДСТУ%20EN%2050160%3A2014.>
- [14] Calculation of the Cyclic and Emergency Current Ratings of Cables, Part 2: Cyclic Rating Factor of Cables Greater than 18/30 (36) kV and Emergency Ratings for Cables of All Voltages [Text]: IEC Std. 60853-2. -- 1989.
- [15] Prime, J.B. Systems to monitor the conductor temperature of underground cable [Text] / J.B. Prime, J.G. Valdes // IEEE Trans. PAS. – 1981. – 100. -- № 1. P. 211 – 219.
- [16] Millar R., John. Real-time transient temperature computation of power cables including moisture migration modeling [Text]: Proceeding of 15th PSCC / John Millar R., Matti Lehtonen. -- Liege, 2005.

Стаття надійшла до редакції 10.08.2022

## MODEL DEVELOPMENT ACCORDING TO INCREASE IN THE ACTIVE RESISTANCE OF THE CONDUCTOR TO AC CURRENT AT THE SURFACE EFFECT

**PROKUDA V.M.** Ph.D, in Technology, assistant of the Electrical Power Engineering Department of the Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: prokuda.v.m@nmu.one;

**RUKHLOVA N.YU** PhD, in Technology assistant of the Electrical Power Engineering Department of the Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: Rukhlova.N.Yu@nmu.one;

**Purpose.** When alternating current with higher harmonics passes through the cable, heating is carried out by the root mean square value of all harmonics. Taking into account the different resistance of the cable depending on the frequency due to the effect of the surface effect, it is advisable to calculate the coefficient of increase in the total current resistance, assuming the action of each harmonic as independent. However, there are prerequisites to consider existing calculation models difficult for algorithmic implementation in software packages. Therefore, the purpose of the work is to develop a calculation model to take into account the increase in the active resistance of the conductor to alternating current due to the surface effect for further use in simulation modeling packages such as, for example, MATLAB.

**Methodology.** Methods of linear algebra, linear regression, defining the coefficient of determination.

**Findings.** Dependencies for determining the resistance value of high-voltage cable lines to high-frequency currents, which take into account the cross-section and harmonic composition of the current, have been obtained. According to the existing and substantiated graphs (dependencies) obtained on the basis of classical expressions from the literature, new simplified calculation dependencies were obtained (for the cross-section of copper cable lines 240 - 1000 mm<sup>2</sup>) when current harmonics above the fifth at a base frequency of 50 Hz. Such calculated ratios will allow taking into account several harmonic components of the current during line heating in the MATLAB Simulink software environment.

The obtained values of the coefficient of determination in defining the calculated dependencies are close to 1, which indicates the correctly selected type of equation and the correctly selected coefficient  $k$  for different cross-sections of the cable line.

**Originality.** The scientific novelty lies in the development of a new dependence, justified by the high value of the multiple correlation coefficient, the correction factor for the increase in the resistance of the cable core from the harmonic number and the empirical coefficient of the regression model, taking into account the cross section of the cable line.

**Practical value.** The practical value of the work consists in obtaining dependencies that can be used in analytical and simulation models when determining the amount of heating of cable lines taking into account the current of harmonics above the fifth at a base frequency of 50 Hz. Such an application will allow in many cases to replace the physical experiment with a simulation in the MATLAB Simulink software environment, which will reduce the necessary human and material costs.

**Keywords:** cable line; heating; higher harmonics; regression; coefficient of determination; MATLAB Simulink; active resistance; surface effect

### REFERENCES

- [1] E. S. Zajcev, V. D. (2016). Lebedev. Algoritm ocenki temperatur zhil trëhfaznyh vysokovol'nyh kabel'nyh linij s izoljaciej iz sshitogo polijetilena. *Jelektricheskie stancii*. 9, 34–38.
- [2] Tze Mei Kuan, Suhaila Sulaiman, Azrul Mohd. Ariffin, Wan Mohamad Shakir Wan Shamsuddin. Verification of MATLAB/Simulink Power Cable Modelling with Experimental Analysis/ *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*. Vol. 11, No. 2, August 2018, pp. 622–629 ISSN: 2502-4752, DOI: 10.11591/ijeecs.v11.i2.pp 622-629.
- [3] Ansovinus Akumawah Nche, Temperature modeling and control algorithm for high voltage underground cables, A thesis submitted to the faculty of The University of North Carolina at Charlotte in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Applied Energy and Electromechanical Systems, Charlotte, 2017 – 104 p.
- [4] D. V. Kudelina, V. I. Birjulin. (2019). Opredelenie nagraeva izoljicii kabel'nyh linij s uchetom vli-janija vysshih garmonik. Auditorium. *Jelektronnyj nauchnyj zhurnal Kurskogo gosudarstvennogo universiteta*. No 1 (21).
- [5] A. A. Alferov, A. V. Zasimenko, T. V. Alferova, ju. A. Rudchenko (2015). Analiz sushhestvujushhih inzhenernyh matematicheskikh modelej ucheta poverhnostnogo jeffekta v tokoprovodjashhih zhilah silovyh kabe-lej. *Vestnik GGTU im. P. O. Suhogo* No 2.
- [6] Bessonov L.A. (2007). Teoreticheskie osnovy jelektrotehniki: Jelektricheskie cepi. Uchebnik dlja

- studen-tov vysshih uchebnyh zavedenij, obuchajushhihsja po napravlenijam podgotovki diplomirovannyh specialistov «Jelektrotehnika, jelektromehanika i jelektrotehnologii», «Jelektrojenergetika», «Priborostroenie». Avtor: Lev Alekseevich Bes-sonov. 11-e izdanie, pererabotannoe i dopolnennoe. Uchebnoe izdanie. Vneshnee oformlenie N.D. Gorbunovoj. M: Gardariki.
- [7] M. Caton, O. Marjanovic and S. Rowland, "Dynamic Thermal Modelling of Low Voltage Underground Cables", University of Manchester report, 2015.
- [8] Aman Sharma, (2017). Determination of Hotspot Location and Power Cable Temperatures from Spare Duct Temperatures in an Underground Installation. A Thesis Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Master of Science. Arizona state university, December. 123. [https://repository.asu.edu/attachments/194055/content/Sharma\\_asu\\_0010N\\_17507.pdf](https://repository.asu.edu/attachments/194055/content/Sharma_asu_0010N_17507.pdf)
- [9] Ansovinus Akumawah Nche, Temperature modeling and control algorithm for high voltage underground cables, A thesis submitted to the faculty of The University of North Carolina at Charlotte in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Applied Energy and Electromechanical Systems, Charlotte, 2017, 104.
- [10] Simulating Thermal Effects in Semiconductors,
- [11] Martin Andersson Ljus, Dynamic Line Rating Thermal Line Model and Control. Division of Industrial Electrical Engineering and Automation Faculty of Engineering, Lund University. CODEN:LUTEDX/(TEIE-5324)/1-49/2013, - 55 p.
- [12] Kabeli silovye dlja stacionarnoj prokladki. Obshhie tehnicheckie uslovija: GOST 24183–80. M.: Izd-vo standartov, 1989. 33 s.
- [13] DSTU EN 50160:2014.. Jakist' elektrichnoï energii. Opublikovano 06 kvitnja 2016. roku Data onovlennja: 21.02.2022.
- [14] Calculation of the Cyclic and Emergency Current Ratings of Cables, Part 2: Cyclic Rating Factor of Cables Greater than 18/30 (36) kV and Emergency Ratings for Cables of All Voltages [Text]: IEC Std. 60853-2, 1989.
- [15] J.B. Prime, J.G. (1981).Valdes Systems to monitor the conductor temperature of underground cable [Text]. IEEE Trans. PAS. 100, No 1, 211 – 219.
- [16] R. Millar, John. (2005). Real-time transient temperature computation of power cables including moisture migration modeling [Text]: Proceeding of 15th PSCC / John Millar R., Matti Lehtonen. Liege.

УДК 621.314.58

## ЗБІЛЬШЕННЯ ВІДМОВОСТІЙКОСТІ РЕЗОНАНСНИХ УСТАНОВОК ІНДУКЦІЙНОГО НАГРІВУ ПІД ЧАС АВАРІЙНОГО РЕЖИМУ РОБОТИ

КАЛИНІЧЕНКО Д.В. аспірант, кафедри електричних та електронних апаратів Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: kalynichenko.d@gmail.com;

**Мета роботи.** Розробити автоматичну систему захисту від виходу з ладу резонансного інвертора установки індукційного нагріву через зникнення навантаження.

**Методи дослідження.** В даній роботі використовуються такі методи дослідження як аналіз передавальної характеристики навантаження резонансного інвертора з використанням апроксимації за першою гармонікою, розрахунок регульованих параметрів числовими методами, комп'ютерне моделювання установки індукційного нагріву. Проведення експериментальних досліджень на основі плавильної установки з мікропроцесорним керуванням з метою перевірки адекватності запропонованої моделі та системи захисту.

**Отримані результати.** Приведена комп'ютерна модель установки індукційного нагріву, що заснована на використанні апроксимації за першою гармонікою, адекватність якої перевірена експериментальними дослідженнями плавильної установки. На основі даної моделі розроблена схема захисту резонансного інвертора від зникнення навантаження, що заснована на зсуві робочої частоти інвертора через введення в ланцюг зворотного зв'язку додаткового зсуву різниці фази струму і напруги. Методика розрахунку даного зсуву фази створена з використанням передавальної характеристики навантаження інвертора (системи «конденсаторна батарея-індуктор-деталь») та числових методів розв'язку рівнянь. Вищезазначена методика розрахунку може бути використана для резонансних інверторів будь-якої конфігурації та топології. Згідно комп'ютерного моделювання аварійної ситуації установки, розроблена схема забезпечує обмеження амплітуди напруги у безпечних межах роботи реактивних елементів інвертора, тоді як в нормальних умовах роботи система захисту не впливає на роботу установки. Система захисту успішно утримує амплітуду струму та напруги у коливальному контурі у безпечних межах у період малого навантаження. Створена схема має достатню простоту для її швидкого впровадження в існуючі установки з цифровим управлінням і має високу швидкодію. Окрім вищезазначених практичних результатів, проведений аналіз попередніх досліджень та надбань, що показали малу вивченість явищ, наявних при роботі резонансних інверторів в аварійному режимі. Це відкриває перспективу проведення подальших наукових розвідок в даній проблематиці.

**Наукова новизна.** Розроблена методика адаптивного обмеження напруги на виході резонансного інвертора будь-якої конфігурації з частотним управлінням.

**Практична цінність.** Створена схема захисту дозволяє зменшити фізичне втручання оператора у технологічний процес індукційного нагріву. Разом з цим відбувається збільшення надійності установок індукційного нагріву. Вигляд запропонованої схеми дозволяє спростити модернізацію існуючих установок та розробку нових більш досконалих моделей.

**Ключові слова:** установка індукційного нагріву; резонансний інвертор; частотне управління; фазове автопідлаштування частоти; захист від перенапруги; передавальна характеристика; апроксимація за першою гармонікою

### I. ВСТУП

Установки індукційного нагріву (УІН) успішно застосовуються у металургії для плавлення та термічної обробки металів та їх сплавів. Підбір параметрів нагріву (товщина шару проникнення магнітного поля, конфігурація магнітного поля тощо) для конкретного технологічного процесу визначає електротехнічне завдання у створенні та використанні інверторів напруги або струму, а також індукторів для генерації змінного магнітного поля.

Велика вихідна потужність, притаманна УІН, спонукає застосовувати методи збільшення ККД інверторів. Зокрема, поширеними є інверторні топології резонансного типу, використання яких зменшують втрати та масогабаритні показники

перетворювачів за рахунок збільшення робочої частоти.

На даний момент, продовжуються розробки нових резонансних топологій та модернізація існуючих для можливості регулювання вихідної потужності. Однак, недостатньо вивченими залишаються механізми захисту інвертора під час аварійного режиму роботи УІН, наприклад, при відсутності деталі чи тиглю в індукторі. В даному дослідженні значна увага приділяється явищу виходу з ладу конденсаторних батарей у коливальному контурі (КК) резонансного інвертора внаслідок зникнення навантаження та методам уникнення цього явища.

## II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Основна частина досліджень у галузі розробки резонансних інверторів і перетворювачів напруги використовують спрощення моделі інвертора за допомогою наближення за першою гармонікою. Опис цього наближення наведений в роботі [1], або її модифікації, приклад однієї з яких наведений в [2]. Це спрощує підбір параметрів реактивних елементів інвертора: конденсатори та індуктори власне резонансної ланки та узгоджувальних елементів.

Реалізації резонансних УІН умовно можна поділити на дві групи за способами регулювання потужності: послідовне з'єднання DC-DC перетворювача для регулювання потужності та резонансного інвертора для генерації коливань струму, поєднання схем модуляції в мостових схемах для резонансного режиму роботи інвертора з широким діапазоном регулювання потужності.

Роботи [3] та [4] висвітлюють практичну реалізацію двох незалежних перетворювачів в одній системі. У той час як DC-DC перетворювач регулює потужність, резонансний інвертор відслідковує і підтримує робочу частоту для забезпечення «м'якого перемикавання» силових елементів. У деяких роботах ([5] і [6]) розглядаються можливості об'єднання схем управління для обох перетворювачів в одну із застосуванням адаптивних або прогнозних моделей.

Одночасне управління потужністю і робочою частотою досягається застосуванням мостових інверторів з фазовим зміщенням (Phase-Shifted Full Bridge). Роботи [7] і [8] розглядають реалізацію такого перетворювача, тоді як [9]-[11] досліджують вплив КК у якості навантаження на режим «м'якого перемикавання» такого перетворювача. Також розглядаються варіанти з використанням мостових резонансних інверторів з фазовим управлінням (Phase-Controlled Resonant Inverter), прикладами реалізації яких зазначені в [12]-[13]. Існують також схеми з так званим «асиметричним управлінням», один з прикладів яких продемонстровані в роботі [14].

Таким чином, використання резонансних топологій в установках індукційного нагріву обумовлене зменшенням комутаційних втрат в перетворювачах. Основний напрямок досліджень – управління потужністю перетворювача зі збереженням високого ККД.

Однак, наявні публікації мало висвітлюють аналіз аварійного режиму роботи цих установок. Зокрема, в роботі [15] ці режими висвітлюються лише у контексті розрахунку відмовостійкості таких установок при визначеній надійності систем захисту. Механізми захисту вважаються чисто інженерною задачею, метою яких є відключення установок до усунення причин аварійної ситуації. Ці дії потребують діагностування оператором і сервісного обслуговування УІН навіть при відсутності поломок. Внаслідок цього існує необхідність у створенні

системи захисту, яка не потребувала б надмірного втручання оператора у технологічний процес.

## III. МЕТА РОБОТИ

На основі моделі, створеною за допомогою наближення за першою гармонікою, розробити механізм запобігання виходу з ладу резонансного перетворювача внаслідок зникнення навантаження (деталі в індукторі). Перевірити працездатність розробленої системи за допомогою комп'ютерного моделювання та експериментальних досліджень

## IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ ТА АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Використання резонансних інверторів в установках індукційного нагріву дозволяє зменшити масо-габаритні показники системи при збільшенні її ККД через забезпечення «м'якого» режиму перемикавання напівпровідникових силових елементів. Для зменшення кількості реактивних елементів індуктор УІН використовується як індуктивність у КК інвертора. Типова модель інвертора УІН зображена на рис. 1, де  $L_d$ ,  $C_d$  - фільтри напруги живлення,  $C_s$  - блокуючий конденсатор,  $T_1$  - узгоджувальний трансформатор,  $C_L$  - конденсатор резонансного контуру,  $L_L$ ,  $R_L$  - індуктивність та опір, що представляють систему «індуктор-навантаження». Такий вигляд системи є найбільш поширеним через можливість звести задачу до аналізу резонансного інвертора послідовного типу.

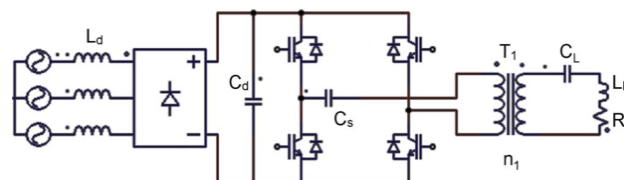


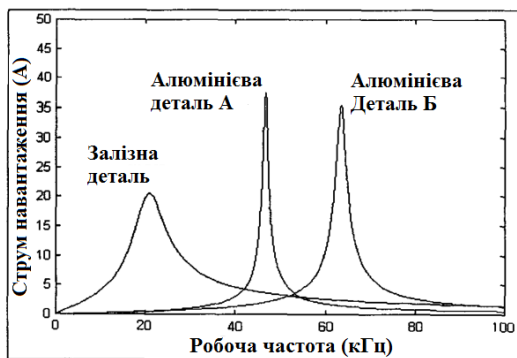
Рисунок 1. Типова модель резонансного інвертора установки індукційного нагріву [11]

Однак, цей аналіз ускладнюється через зміну  $L_L$  в залежності від матеріалу і геометрії навантаження індуктора [16], а також від процесу нагріву (наприклад, при досягненні точки Кюрі в місці нагріву феромагнітного матеріалу стрімко змінюється магнітна проникність викликає зміну  $L_L$ ). Ця зміна прямим чином впливає на характеристики навантаження інвертора, що можна спостерігати у залежності струму навантаження від робочої частоти інвертора для різних деталей в індукторі (рис.2).

Для того, щоб відслідковувати ці зміни в частоті, найчастіше використовуються схеми фазового автопідлаштування частоти (ФАПЧ). Застосування цієї схеми полягає у тому, щоб різниця фаз коливань струму і напруги, що спостерігаються в коливальному контурі, відповідала значенню при резонансі чи



близькому до нього. В реальних установках, через паразитні ємності у схемі, систему управління налаштовують на підтримання значення частоти вище резонансної для забезпечення індуктивного характеру навантаження інвертора. Це забезпечує «м'яке» перемикання (перемикання у нулі напруги, ZVS) задля зменшення комутаційних втрат.



**Рисунок 2.** Залежність струму навантаження від робочої частоти, форми і матеріалу деталі в індукторі [16]

Однак, використання ФАПЧ, задачею якої є максимізація вихідної потужності, несумісне з необхідністю регулювати цю потужність. Особливо це помітно при малому навантаженні інвертора: неконтрольована накачка енергії у КК без її обмеження викликає стрімкий ріст амплітуди коливань напруги та струму у контурі. У реальних системах реактивні елементи (конденсатор або набір конденсаторів та індуктор) гарантовано виходять з ладу при спробах запуску інвертора без деталі або тигля в індукторі.

Для попередження цього явища існують декілька підходів. Зокрема, використовується примусове зміщення робочої частоти для виходу з резонансу або вимкнення інвертора за сигналом-індикацією перевантаження контуру. Останній варіант, через різноманіття датчиків, є досить легким у впровадженні, але такий спосіб потребує уваги оператора УН для усунення проблеми. У той самий час, зміщення робочої частоти може забезпечити безперервність роботи установки через можливість виходу з резонансу при малому навантаженні чи його відсутності та поверненні роботи системі у режим резонансу при робочому навантаженні.

Для розгляду запропонованої реалізації системи захисту на основі зміщення робочої частоти використовується модель УН, що зображена на рис. 3. Ця модель є типовою для більшості досліджень УН ([3], [7], [8], [9], [11], [16]). Вона заснована на наближенні за першою гармонікою [1]. Згідно цього наближення, однофазний інвертор будь-якої топології можна представити у якості джерела синусоїдальної напруги (інвертор напруги) або струму (інвертор струму) через частото-селективний характер резонансного контуру високої добротності. З огляду на це, виконуюча частина моделі представлена синусоїдальним генератором напруги з амплітудою

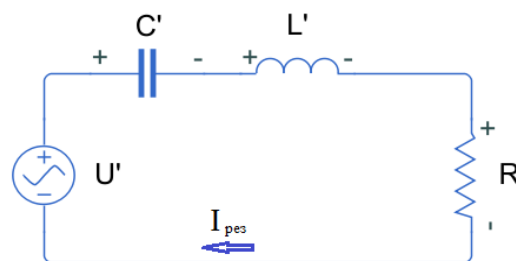
$U_{дж}$ , підключеного до коливального контуру «конденсатор-індуктор-навантаження», представленого  $C'$ ,  $L'$ ,  $R'$ :

$$U'(t) = U_{дж} \cdot \sin(2\pi f_{роб}).$$

Слід відмітити, що більш повна модель «індуктор-навантаження» матиме вигляд трансформатора з одним витком у вторинній обмотці та повітряним осердям, де навантаження  $R_L$  підключене до вторинної обмотки ([16]). Тому при подальшому спрощенні до послідовного КК слід враховувати, що

$$R' \approx 1 / R_L.$$

Звідси випадок «зникнення» навантаження в індукторі відповідатиме  $R' \rightarrow 0$  при  $R_L \rightarrow \infty$ .



**Рисунок 3.** Модель резонансного інвертора УН

Для оцінки адекватності використаної моделі, були проведені експерименти з використанням стенду УН. Параметри цієї установки вказані в табл. 1. Цей стенд є робочою плавильною УН з мікропроцесорним керуванням, що дозволяє швидко впроваджувати модифікації до схеми управління. Дана установка використовує знижуючий DC-DC перетворювач для ручного регулювання потужності напівмостового інвертора напруги. Навантаженням цього інвертора є коливальний контур (рис.4) у вигляді послідовного з'єднання конденсаторної батареї, узгоджувального трансформатора та індуктора. Блок датчиків КК (рис.4, 4) знімає необхідні показники і передає до мікропроцесорного блоку управління, який і здійснює керування установкою.

Для співставлення комп'ютерної моделі з експериментальною установкою були виконані виміри різниці фаз струму і напруги КК при різних частотах. В моделі знімаються виходи фазових детекторів струму і напруги, тоді як в експериментальній установці – вихід фазового детектору струму і управляючий сигнал одного з транзисторів. Такий вибір сигналів обумовлюється легкістю виміру з мінімізацією похибки виміру фази в експериментальній установці. Через неідеальність фазового детектора струму, що складається з трансформатора струму та компаратора, очікувана точність виміру фази складає від  $\pm 10\%$  поблизу власної частоти КК до  $+50\%$  на верхній межі робочих частот інвертора. Описані сигнали

знімаються на частоті нижчій за резонансну (рис.5), що близька до резонансної (рис.6) та вищій за резонансну. Чисельний вигляд різниці фази у всіх випадках приведений у табл. 2.



1 - індуктор з тиглем; 2 - узгоджувальний трансформатор;  
3 - конденсаторна батарея; 4 - вузол для зняття параметрів КК

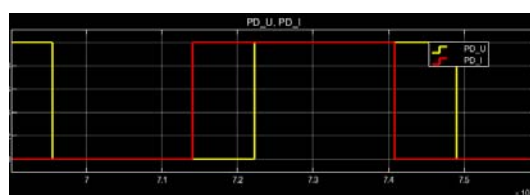
**Рисунок 4.** Коливальний контур експериментальної установки з блоком датчиків

**Таблиця 1.** Характеристики моделі УН

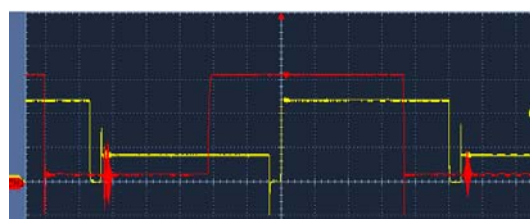
Параметр	Значення
Вихідна потужність $P$	12,5 кВт
Зведена вхідна напруга КК $U_{ДЖ}$	26,5 В
Ємність КК $C'$	9,02 мкФ
Індуктивність КК $L'$	4,95 мкГн
Розрахована добротність КК при номінальному навантаженні $Q_{роб}$	3
Еквівалентний опір при номінальному навантаженні $R'_{роб}$	0,25 Ом
Добротність реактивних елементів КК $Q_{L'}, Q_{C'}$	500
Максимально допустима напруга на ємності КК $U_{Cmax}$	2000 В
Власна частота КК $f_0$	23,8 кГц

Для співставлення комп'ютерної моделі з експериментальною установкою були виконані виміри різниці фаз струму і напруги КК при різних частотах. В моделі знімаються виходи фазових

детекторів струму і напруги, тоді як в експериментальній установці – вихід фазового детектору струму і управляючий сигнал одного з транзисторів. Такий вибір сигналів обумовлюється легкістю виміру з мінімізацією похибки виміру фази в експериментальній установці. Через неідеальність фазового детектора струму, що складається з трансформатора струму та компаратора, очікувана точність виміру фази складає від  $\pm 10\%$  поблизу власної частоти КК до  $+50\%$  на верхній межі робочих частот інвертора. Описані сигнали знімаються на частоті нижчій за резонансну (рис.5), що близька до резонансної (рис.6) та вищій за резонансну. Чисельний вигляд різниці фази у всіх випадках приведений у табл. 2.

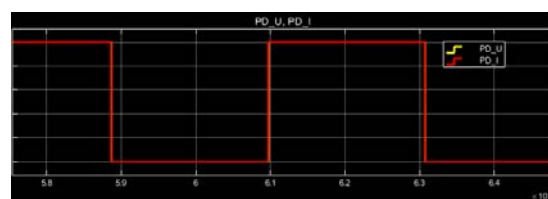


а



б

**Рисунок 5.** Осцилограми фазових детекторів струму і напруги моделі (а) та експериментальної установки (б) при  $f_{роб} = 18,7 \text{ кГц}$



а



б

**Рисунок 6.** Осцилограми фазових детекторів струму і напруги моделі (а) та експериментальної установки (б) при  $f_{роб} = 23,8 \text{ кГц}$

**Таблиця 2.** Порівняння різниці фази струму і напруги моделі і експериментальної установки

Робоча частота $f_{роб}$ , кГц	Різниця фази струму і напруги $\Delta\varphi$ , град.	
	Модель	Стенд
18,7	-56,2	-55
23,8	-0,2	2
30	54,5	85

На основі отриманих даних можна зробити висновок, що модель УІН відповідає реальній установці. Це дає змогу розглядати розроблену схему захисту без її практичної реалізації.

У якості схеми регулювання робочої частоти за основу береться схема ФАПЧ. В даному випадку, ФАПЧ порівнює різницю фаз коливань струму і напруги в резонансному контурі

$$\Delta\varphi = \varphi_{U'} - \varphi_{I_{рез}}$$

з опорним значенням  $\varphi_{оп}$  і змінює частоту генератора  $U'$  до досягнення рівності  $\Delta\varphi$  та  $\varphi_{оп}$ . В ідеальному випадку (абсолютна точність виміру фаз) при  $\varphi_{оп} = 0$  встановлена цим алгоритмом робоча частота відповідатиме власній резонансній частоті LC-контурі. Необхідне зміщення частоти можна досягти введенням у якості  $\varphi_{оп}$  суму

$$\varphi_{оп} = \varphi_{ZVS} + \varphi_{РЕГУЛ}, \quad (1)$$

де  $\varphi_{ZVS}$  - фазовий зсув для забезпечення «м'якого» перемикавання напівпровідникових елементів;

$\varphi_{РЕГУЛ}$  - фазовий зсув для забезпечення безперервності роботи інвертора при малому навантаженні чи його відсутності.

$\varphi_{ZVS}$  залежить від навантаження установки через необхідність розряджання (заряджання) вихідної ємності транзисторів інвертора для забезпечення ZVS режиму. Але, з огляду на аналіз лише граничних умов використання інвертора, цю величину можна прийняти за постійну.

Найбільша увага приділяється значенню  $\varphi_{РЕГУЛ}$ . Цей параметр, для забезпечення відмовостійкості установки, повинен відповідати двом критеріям:

1) при робочому навантаженні  $\varphi_{РЕГУЛ} = 0$ , тобто необхідна відсутність впливу на роботу установки;

2) при малих навантаженнях  $\varphi_{РЕГУЛ}$  приймає значення для встановлення робочої частоти інвертора, за якого амплітудні значення напруги і струму у сталому режимі не виходили за межі допустимих.

Задачу з пошуку масиву значень  $\varphi_{РЕГУЛ}$ , відповідно до роботи [17], можна вирішити застосувавши частотні характеристики навантаження:

вхідний опір, вихідний опір, струм та напруга на окремих елементах тощо. Основна увага приділяється амплітудно-частотній характеристиці (АЧХ) та фазо-частотній характеристиці (ФЧХ) спрощеної схеми навантаження інвертора. Їх використання дозволяє оцінити вплив зміни навантаження  $R'$  на частотну залежність струму та напруги у КК і визначити необхідне зміщення частоти для отримання заданої амплітуди коливань. Через незначний вплив зміни  $L'$  на АЧХ, у порівнянні зі зміною  $R'$ , можна прийняти за постійну величину. За допомогою ФЧХ отримується необхідне значення  $\varphi_{РЕГУЛ}$ . Таким чином, ця задача з пошуку зводиться до розв'язання рівняння відносно робочої частоти  $f_{роб}$

$$|U_{C'}| = U_{дж} \cdot |W(f_{роб}, R')|, \quad (2)$$

де  $|U_{C'}|$  - амплітуда коливань напруги на конденсаторі  $C'$ ;

$W(f_{роб}, R')$  - передавальна функція схеми навантаження по відношенню до  $R'$  в залежності від робочої частоти  $f_{роб}$  та навантаження  $R'$ .

Рішення (2) аналітичними методами є складною задачею, а тому, враховуючи велике різноманіття реалізацій КК у резонансних інверторах, не розглядається. Найчастіше резонансним ланкам, що застосовуються, надають одну чітко виражену резонансну частоту, тому прийнятним вважається пошук рішень кількісними методами. У цьому випадку пропонується метод ітераційного наближення з верхньої межі  $f_{роб}$  при сталому  $R'$  для знаходження частоти коливань генератора для досягнення визначеного  $U_{C'}$ .

Враховуючи вищезазначене, алгоритм визначення масиву  $\varphi_{РЕГУЛ}$  матиме наступний вигляд:

1) визначення максимально допустимої амплітуди  $U_{C'}$ , що відповідає робочому режиму інвертора;

2) визначення значень  $R'$  (або добротності  $Q_{мен.}$ ), для розрахунку необхідного зсуву частоти на основі цих значень, що не відповідатимуть робочому режиму інвертора;

3) вибір очікуваної  $|U_{C'}|$  для заданого  $R'$  (або  $Q_{мен.}$ ) для пошуку  $f_{роб}$  як розв'язання рівняння (2);

4) розрахунок  $\varphi_{РЕГУЛ}$  відповідно до знайдених значень  $f_{роб}$ .

У випадку відсутності навантаження єдиним фактором, що обмежуватиме зростання амплітуди напруги у КК в реальних системах є добротність, або паразитний опір, застосованих реактивних елементів, тому випадки зменшення навантаження, при яких

$$Q_{мен.} > Q_{L',C'}$$

не розглядатимуться.

Відповідно до характеристик УІН та обраної ємності, приймаємо, що розроблюваний захист починає впливати на схему при

$$Q_{мен.} \geq 2,5Q_{роб.}$$

Відповідно до моделі, що зображена на рис. 3, передавальна характеристика КК відносно  $C'$  матиме вигляд

$$W(p) = \frac{1/pC'}{1/pC' + pL' + R'}, \quad (3)$$

де  $p = 2\pi \cdot j \cdot f$  - оператор Лапласа.

АЧХ (4) та ФЧХ (5) КК відносно  $C'$ , відповідно, матиме наступний вигляд:

$$|W(w)| = \frac{1}{\sqrt{(1 - w^2 L' C')^2 + (w R' C')^2}}, \quad (4)$$

$$\arg(W(w)) = \arctg \frac{w R' C'}{1 - w^2 L' C'}. \quad (5)$$

Для спрощення подальшого аналізу замість неперервної функції  $\varphi_{РЕГУЛ}(|U_{C'}|)$  пропонується застосувати дискретний набір значень з гістерезисом. Це дозволяє зменшити час налаштування чутливості схеми регулювання частоти. Початкові дані для рівняння (2) беруться із міркувань подальшого збільшення стабільності регулювання частоти. Значення  $|U_{C'}|$  та  $Q_{мен.}$  при цьому обираються за наступними формулами:

$$Q_{мен.}[k] = 2,5Q_{роб.} + \frac{Q_{L',C'} - 2,5Q_{роб.}}{\sqrt{K}} k^2,$$

$$U_C[k] = U_{нориз} + \frac{0,7U_{Cmax} - U_{нориз}}{K} k,$$

де  $k = 0, 1, \dots, K$  - порядковий номер з набору  $K + 1$  елементів. Таким чином,  $U_C[0]$  відповідає нормальній роботі УІН, а розв'язок рівняння (2)  $f_{роб}[K]$  для значень  $Q_{мен.}[K]$  та  $U_C[K]$  задовольнятиме умову

$$|U_C| \leq 0,7U_{Cmax} \text{ при } Q_{мен.} = Q_{L',C'}.$$

Розв'язки (2) для всього набору значень утворюють інтерпольовану залежність  $\varphi_{РЕГУЛ}(|U_{C'}|)$ , що зображена на рис. 7.

Для аналізу впливу введення  $\varphi_{РЕГУЛ}$  у ланцюг зворотного зв'язку схеми регулювання установки в аварійному режимі була створена комп'ютерна

модель, загальний вигляд якої представлений на рис. 8.

Блок «Генератор» відповідає за створення синусоїдальної форми коливання для джерела напруги  $U'(t)$  у блоці «RLC схема», де останній відтворює модель, зображену на рис. 3. За, безпосередньо, управління моделлю УІН відповідають блоки «ФАПЧ» та «Фазовий детектор». Блок «Фазовий детектор» знімає форму струму  $I_{рез}$  з КК і створює на своєму виході сигнал зворотного зв'язку у вигляді  $\Delta\varphi$  для ФАПЧ, який, в свою чергу, задає частоту коливань. Вищезазначені блоки утворюють повноцінну модель УІН з відслідковуванням резонансної частоти КК.

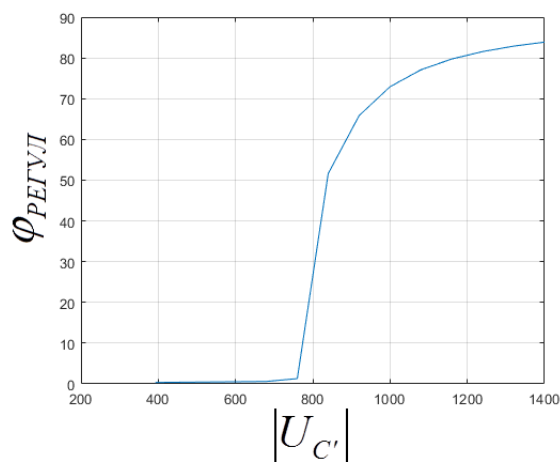


Рисунок 7. Інтерпольована залежність  $\varphi_{РЕГУЛ}(|U_{C'}|)$  для заданої моделі УІН

Блок «Перетворювач «Напруга-фаза»», отримуючи поточне значення амплітуди напруги на конденсаторі від блоку «Піковий детектор», формує на виході значення  $\varphi_{РЕГУЛ}$ . Сформоване значення  $\varphi_{РЕГУЛ}$  відповідає залежності  $\varphi_{РЕГУЛ}(|U_{C'}|)$ , розрахованої перед початком симуляції. Робота даного блоку може призупинятися для моделювання відсутності захисту установки.

Для перевірки роботи запропонованої схеми захисту розглядається порівняння випадків зникнення навантаження, для чого моделюється швидке зростання значення  $R'$  за межі робочого діапазону для УІН без захисту (рис. 9а) та із захистом (рис. 9б). При моделюванні приймається, що  $R'$  дорівнює  $R'_{роб}$  в момент запуску симуляції ( $R'(t_{симул} = 0) = R'_{роб}$ ). Також моделюється короткочасне збільшення  $R'$  при наявності захисту для перевірки здатності системи повернутися до нормального режиму роботи, результати симуляції якого зображені на рис. 10.

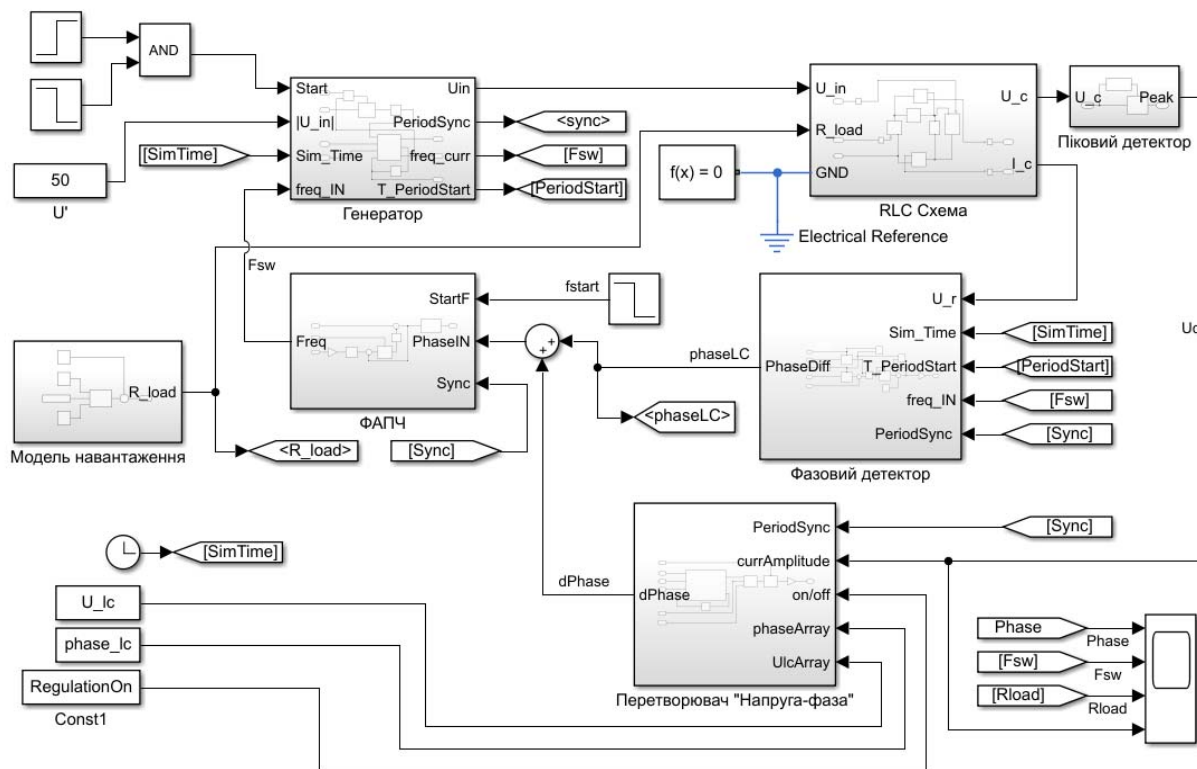


Рисунок 8. Модель УІН для дослідження із запропонованою схемою захисту

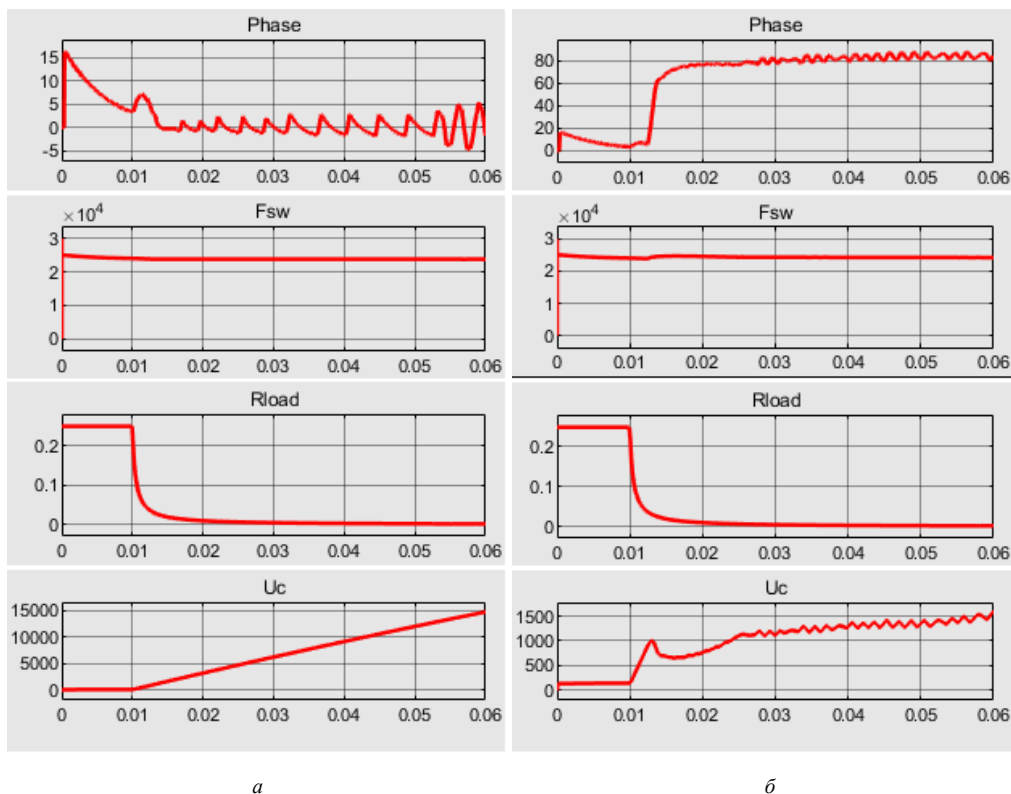


Рисунок 9. Результати симуляції моделі УІН у випадку зникнення навантаження у випадку відсутності (а) та наявності (б) схеми захисту

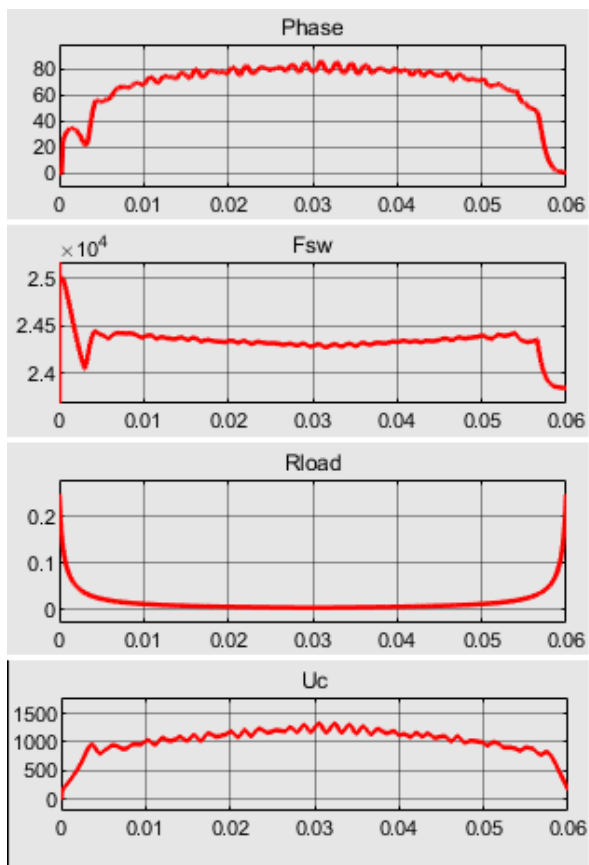
## V. ВИСНОВКИ

У роботі був проведений аналіз явища, який лежить в основі виходу з ладу установки індукційного нагріву через відсутність деталі або тиглю в індукторі.

На основі резонансного інвертора напруги з частотним управлінням була розроблена модель УІН для подальших досліджень. Для перевірки відповідності моделі реальним установкам проведено порівняння роботи моделі з експериментальною плавильною УІН із мікропроцесорним керуванням. Проведені дослідження показали можливість проведення подальшої розробки схеми захисту, використовуючи лише запропоновану модель.

На основі моделі розроблена схема захисту інвертора від перенапруги у коливальному контурі через відсутність навантаження. Методика розрахунку параметрів цієї схеми приведена у вигляді, який дозволяє швидко впровадити в існуючі установки з цифровим управлінням.

Була створена комп'ютерна модель УІН для симуляції аварійних випадків при її використанні. Під час симуляції була підтверджена працездатність запропонованої схеми захисту. Також була відмічена необхідність подальшого дослідження стабільності роботи частотного регулювання потужності резонансного інвертора з широким діапазоном допустимого навантаження.



**Рисунок 10.** Результати симуляції моделі УІН у випадку короточасного зникнення навантаження

Результати симуляції (рис.9, рис.10) показують здатність схеми захисту утримувати амплітуду коливань у КК в межах діапазону допустимих напруг використаних елементів. Згідно рис.10, система захисту, утримуючи амплітуду коливань у допустимих межах при аварійному зменшенні навантаження, здатна без зовнішнього втручання повернути систему у повний резонансний режим роботи при зникненні аварійного стану установки.

Внаслідок того, що у першому наближенні залежність різниці фази  $\Delta\varphi$  від зміни робочої частоти пропорційне добротності КК

$$\Delta\varphi \approx Q_{мен} \Delta f_{роб}$$

існують проблеми у налаштуванні чутливості ФАПЧ для швидкодіючої регуляції та уникнення автоколивальних процесів в усьому діапазоні можливих значень  $Q_{мен}$ , які наявні при роботі моделі (рис.9). Тому, окрім ефективності запропонованої системи захисту, це моделювання показує необхідність у подальших дослідженнях щодо використання схем частотної модуляції у резонансних інверторах.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Duerbaum, T. First harmonic approximation including design constraints / T. Duerbaum // INTELEC - Twentieth International Telecommunications Energy Conference. – 1998. – ISBN 0-7803-5069-3.
- [2] Bucher, A. Extended first harmonic approximation in case of LLC converters with capacitive output filter / A. Bucher, T. Duerbaum // Melecon 2010 - 2010 15th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference. – 2010. – P. 1303-1308. – ISBN 978-1-4244-5795-3 (Electronic).
- [3] Borage, M. A 25 kW, 25 kHz Induction Heating Power Supply for MOVPE System Using L-LC Resonant Inverter / M. Borage, S. Tiwari // Advances in Power Electronics. – 2013. - Vol. 2013.
- [4] Okuno, A. Practical evaluations of load-adaptive high-frequency resonant PAM inverter using static induction power transistors for industrial induction-heating plants / A. Okuno, M. Hayashi, H. Kawano, M. Nakaoka // Proceedings of IECON '93 - 19th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics. – 1993. – Vol. 2. – P. 1015-1020. – ISBN 0-7803-0891-3.
- [5] Zerouali, S. An Adaptive Control Applied to Series Resonant Inverter for Induction Heating / S. Zerouali, A. Allag, S.M. Mimoune, A.H. Hamida, S.

- Khanniche, M. Feliachi // Proceedings of the 41st International Universities Power Engineering Conference. – 2006. – P. 633-636. – ISBN 978-186135-342-9.
- [6] Nawaz, M. A power control scheme of a medium frequency induction furnace [PhD Thesis] / M. Nawaz. – 2017. - University of Engineering and Technology Lahore. – Режим доступу : <http://pr.hec.gov.pk/jspui/handle/123456789//8373>.
- [7] Grajales, L. Control system design and small-signal analysis of a phase-shift-controlled series-resonant inverter for induction heating / L. Grajales, F.C. Lee // Proceedings of PESC '95 - Power Electronics Specialist Conference. – 1995. – Vol.1. – P. 450-456. – ISBN 0-7803-2730-6.
- [8] Grajales, L. Design of a 10 kW, 500 kHz phase-shift controlled series-resonant inverter for induction heating / L. Grajales, J.A. Sabate, K.R. Wang, W.A. Tabisz, F.C. Lee // Conference Record of the 1993 IEEE Industry Applications Conference Twenty-Eighth IAS Annual Meeting. – 1993. – Vol. 2. – P. 843-849. – ISBN 0-7803-1462-X.
- [9] Nagai, S. High-frequency inverter with phase-shifted PWM and load-adaptive PFM control strategy for industrial induction-heating / S. Nagai, H. Nagura, M. Nakaoka, A. Okuno // Conference Record of the 1993 IEEE Industry Applications Conference Twenty-Eighth IAS Annual Meeting. – 1993. – Vol. 3. – P. 2165-2172. – ISBN 0-7803-1462-X.
- [10] Viriya, P. Analysis of Two Continuous Control Regions of Conventional Phase Shift and Transition Phase Shift for Induction Heating Inverter under ZVS and NON-ZVS Operation / P. Viriya, N. Yongyuth, K. Matsuse // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2008. – Vol. 23, No. 6. – P. 2794-2805. – ISSN 1941-0107 (Electronic).
- [11] Esteve, V. Improving the Reliability of Series Resonant Inverters for Induction Heating Applications / V. Esteve, J. Jordán, E. Sanchis-Kilders, E.J. Dede, E. Maset, J.B. Ejea, A. Ferreres // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2014. – Vol. 61, No. 5. – P. 2564-2572. – ISSN 1557-9948 (Electronic).
- [12] Mishima, T. New Current Phasor-Controlled ZVS Twin Half-Bridge High-Frequency Resonant Inverter for Induction Heating / T. Mishima, C. Takami, M. Nakaoka // IEEE Industrial Electronics Magazine. – 2014. – Vol. 61, No.5. – P. 2531-2545. – ISSN 1557-9948 (Electronic).
- [13] Kazimierczuk, M.K. Resonant power converters / M.K. Kazimierczuk, D. Czarkowski. – 2nd ed. – Hoboken, NJ : John Wiley & Sons, Inc. – 2011. – ISBN 978-0-470-90538-8.
- [14] Chudjuarjeen, S. An improved LLC resonant inverter for induction heating with asymmetrical control / S. Chudjuarjeen, A. Sangswang, C. Koompai // 2009 IEEE International Symposium on Industrial Electronics. – 2009. – P. 1612-1617. – ISBN 978-1-4244-4347-5.
- [15] Prodanov, P. Reliability of power supplies for induction heating through an analysis of the states in operating modes / P. Prodanov, D. Dankov // 2017 International Symposium on Power Electronics (Ee). – 2017. – P. 1-5. – ISBN 978-1-5386-3502-5 (Electronic).
- [16] Young-Sup Kwon. Half-bridge series resonant inverter for induction heating applications with load-adaptive PFM control strategy / Young-Sup Kwon, Sang-Bong Yoo, Dong-Seok Hyun // APEC '99. Fourteenth Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition. 1999 Conference Proceedings. – 1999. – Vol. 1. – P. 575-581. – ISBN 0-7803-5160-6.
- [17] Калиніченко, Д.В. Метод автоматичного регулювання параметрів установки індукційного нагріву [Магістерська дипломна робота] / Д.В. Калиніченко. – 2019. – Режим доступу : <http://eir.zntu.edu.ua/handle/123456789/7306>

Стаття надійшла до редакції 15.09.2022

## INCREASE OF FAILURE RESISTANCE OF RESONANT INDUCTION HEATING INSTALLATIONS DURING EMERGENCY OPERATION

KALYNICHENKO D.V. Ph.D. student of the electrical apparatuses department of the National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: [kalynichenko.d@gmail.com](mailto:kalynichenko.d@gmail.com);

**Purpose.** To develop an automatic protection system against the failure of the resonance inverter of the induction heating installation due to the loss of load.

**Methodology.** This work uses such research methods as the analysis of the transmission characteristic of the resonant inverter load using the approximation by the first harmonic, the calculation of control parameters by numerical methods, computer modeling of the induction heating installation. Conducting experimental studies on the basis of a melting plant with microprocessor control in order to check the adequacy of the proposed model and

protection system.

**Findings.** A computer model of the induction heating installation based on the use of the first harmonic approximation is presented, the adequacy of which is verified by experimental studies of the melting installation. Based on this model, a resonant inverter protection scheme against load loss was developed, which is based on a shift in the operating frequency of the inverter due to the introduction of an additional shift in the current and voltage phase difference into the feedback circuit. The methodology for calculating this phase shift was created using the transfer characteristic of the inverter load (the "capacitor battery-inductor-part" system) and numerical methods for solving equations. The above calculation method can be used for resonant inverters of any configuration and topology. According to the computer simulation of the induction heating unit operation during fault, the developed system limits the voltage amplitude within the safe operating region of the inverter reactive elements, while in normal operating conditions the protection system does not affect the operation of the unit. The protection system successfully keeps the amplitude of current and voltage in the oscillating circuit within safe limits during low loads. The created system is simple enough for its quick implementation in existing digitally controlled units and has high speed.

**Originality.** Methodology to create voltage limiting system for resonant inverters of any configuration with frequency control has been developed.

**Practical value.** The created protection scheme allows to reduce the physical intervention of the operator in the technological process of induction heating. Moreover, there is an increase in the reliability of induction heating installations. The appearance of the proposed scheme makes it possible to simplify the modernization of existing installations and the development of new, more advanced models.

**Keywords:** induction heating unit; resonant inverter; frequency control; phase-locked loop; overvoltage protection; transfer function; first harmonic approximation

## REFERENCES

- [1] Duerbaum, T. First harmonic approximation including design constraints. *IEEE INTELEC '98 International Telecommunications Energy Conference*. DOI: 10.1109/intlec.1998.793519
- [2] A. Bucher, A., Duerbaum, T. (2010). Extended first harmonic approximation in case of LLC converters with capacitive output filter. *Melecon 2010 - 2010 15th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference*, 1303-1308. DOI: 10.1109/MELCON.2010.5475963
- [3] Borage, M., Tiwari, S. (2013). A 25 kW, 25 kHz Induction Heating Power Supply for MOVPE System Using L-LC Resonant Inverter. *Advances in Power Electronics*, . DOI: 10.1155/2013/584129
- [4] Okuno, A., Hayashi, M., Kawano, H., Nakaoka, M. (1993). Practical evaluations of load-adaptive high-frequency resonant PAM inverter using static induction power transistors for industrial induction-heating plants. *Proceedings of IECON '93 - 19th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics*, 2, 1015-1020. DOI: 10.1109/IECON.1993.339135
- [5] Zerouali, S., Allag, A., Mimoune, S.M., Hamida, A.H., Khanniche, S., Feliachi, M. (2006). "An Adaptive Control Applied to Series Resonant Inverter for Induction Heating," *Proceedings of the 41st International Universities Power Engineering Conference*, 633-636, DOI: 10.1109/UPEC.2006.367555
- [6] Nawaz, M. (2017). A power control scheme of a medium frequency induction furnace. [PhD Thesis, University of Engineering and Technology Lahore]. Retrieved from <http://pr.hec.gov.pk/jspui/handle/123456789//8373>
- [7] Grajales, L., Lee, F.C. (1995). Control system design and small-signal analysis of a phase-shift-controlled series-resonant inverter for induction heating. *Proceedings of PESC '95 - Power Electronics Specialist Conference*, 1, 450-456. DOI: 10.1109/pesc.1995.474849
- [8] Grajales, L., Sabate, J.A., Wang, K.R., Tabisz, W.A., Lee, F.C. (1993) Design of a 10 kW, 500 kHz phase-shift controlled series-resonant inverter for induction heating. *Conference Record of the 1993 IEEE Industry Applications Conference Twenty-Eighth IAS Annual Meeting*, 2, 843-849. DOI: 10.1109/IAS.1993.298997
- [9] Nagai, S., Nagura, H., Nakaoka, M., Okuno, A. (1993). High-frequency inverter with phase-shifted PWM and load-adaptive PFM control strategy for industrial induction-heating. *Conference Record of the 1993 IEEE Industry Applications Conference Twenty-Eighth IAS Annual Meeting*, 3, 2165-2172. DOI: 10.1109/IAS.1993.299167
- [10] Viriya, P., Yongyuth, N., Matsuse, K. (2008). Analysis of Two Continuous Control Regions of Conventional Phase Shift and Transition Phase Shift for Induction Heating Inverter under ZVS and NON-ZVS Operation. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 23, 6, 2794-2805. DOI: 10.1109/TPEL.2008.2004037
- [11] Esteve V. et al. (2014). Improving the Reliability of Series Resonant Inverters for Induction Heating Applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61, 5, 2564-2572. DOI:



- 10.1109/TIE.2013.2278509
- [12] Mishima, T., Takami, C., Nakaoka, M. (2014). A New Current Phasor-Controlled ZVS Twin Half-Bridge High-Frequency Resonant Inverter for Induction Heating. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 61, 5, 2531-2545. DOI: 10.1109/TIE.2013.2274420
- [13] Kazmierczuk, M.K., Czarkowski, D. (2011). Resonant power converters (2nd ed.). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc.
- [14] Chudjuarjeen, S., Sangswang, A., Koumpai, C. (2009). An improved LLC resonant inverter for induction heating with asymmetrical control. *2009 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 1612-1617. DOI: 10.1109/ISIE.2009.5222544
- [15] Prodanov, P., Dankov, D. (2017). Reliability of power supplies for induction heating through an analysis of the states in operating modes. *2017 International Symposium on Power Electronics (Ee)*, 1-5. DOI: 10.1109/PEE.2017.8171671
- [16] Young-Sup Kwon, Sang-Bong Yoo, Dong-Seok Hyun. (1999). Half-bridge series resonant inverter for induction heating applications with load-adaptive PFM control strategy. *APEC '99. Fourteenth Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition. 1999 Conference Proceedings*, 1, 576-581. DOI: 10.1109/APEC.1999.749738
- [17] Kalynichenko, D.V. (2019). Metod avtomatichnogo reguljuvannja parametriv ustanovky indukcijnogo nagrivu [Magisters'ka dyplomna robota, NU «ZP»]. Repozytorij NU «ZP». <http://eir.zntu.edu.ua/handle/123456789/7306>

УДК 621.311: 621.314.2

## МОЖЛИВОСТІ ЗМЕНШЕННЯ ВПЛИВУ ЧРП НА ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В МЕРЕЖАХ ПІДПРИЄМСТВ ТА ВАРТОСТІ ЙОГО ВИКОРИСТАННЯ

- КАЧАН Ю.Г.** д-р техн. наук, професор, професор кафедри електропостачання промислових підприємств Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: kachan@zntu.edu.ua;
- ШРАМ О.А.** канд. техн. наук, доцент, завідувач кафедри електропостачання промислових підприємств Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: alexshrum@yahoo.com;
- СВЕРГУН А.В.** аспірант кафедри електропостачання промислових підприємств Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: temas2517@gmail.com;

**Мета роботи.** Імітаційне моделювання внутрішньоцехових систем електропостачання й порівняльна оцінка на його основі коефіцієнтів спотворення синусоїдальної кривої напруги.

**Методи дослідження.** Методи імітаційного моделювання внутрішньоцехових систем електропостачання. Чисельні методи обробки отриманих результатів. Методи обчислення дискретного перетворення Фур'є.

**Отримані результати.** Для підвищення рівня автоматизації технологічних процесів в промислових електроустановках знаходять широке застосування перетворювачі частоти. Разом з усіма перевагами використання частотно-регульованого привода призводить до спотворення синусоїдальної форми графіка напруги. В статті проведено оцінку коефіцієнта спотворення синусоїдальної кривої напруги для двох варіантів побудови внутрішньоцехової мережі промислового підприємства. Запропоноване рішення дозволяє покращити форму кривої напруги приводу за рахунок зменшення кількості нелінійних напівпровідникових елементів в системі електропостачання та знизити вплив вищих гармонічних складових на електромережу. Одночасно це дає можливість здешевити використання ЧРП на підприємстві.

**Наукова новизна.** Шляхом експериментального дослідження встановлено, що використання загального випрямляча у поєднанні з загальною шиною постійного струму та індивідуальних інверторів дозволяє знизити коефіцієнт спотворення синусоїдальної кривої напруги.

**Практична цінність.** Розроблені імітаційні моделі роботи цехової мережі дозволяють досліджувати показники якості електричної енергії як в стаціонарних, так і в перехідних режимах роботи.

**Ключові слова:** частотно-регульований привод; якість електричної енергії; коефіцієнт спотворення синусоїдальної кривої напруги; внутрішньоцехова мережа; вартість використання ЧРП.

### I. ВСТУП

Частотно-регульований привод (ЧРП) широко застосовується на промислових підприємствах для підвищення енергоефективності, надійності та забезпечення оптимальних режимів роботи електротехнічних комплексів та систем [1] – [3]. Використання ЧРП дозволяє підвищити точність та розширити діапазон регулювання, знизити споживання електричної енергії, забезпечити плавний пуск двигунів, збільшити термін служби механічної частини привода тощо [1] – [11].

### II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Але разом з цим необхідно зазначити, що застосування ЧРП негативно впливає на ряд показників якості електричної енергії. В ряді робіт автори відмічають, що наявність великої кількості напівпровідникових елементів в електричній мережі

призводить до збільшення рівня вищих гармонічних складових струмів та напруг. Так, в промислових мережах з великою кількістю перетворювачів рівень вищих гармонічних складових може сягати 20 – 25% [4]. Причому топологія електромережі, тип перетворювачів та параметри їх системи керування впливають на рівень та склад гармонік [1], [2], [3].

Збільшення коефіцієнта спотворення синусоїдальної кривої напруги викликає додаткові втрати енергії в елементах мережі та обмотках електричних машин [12] – [16]. Також наявність вищих гармонічних складових призводить до зростання діелектричних втрат в ізоляції та скорочення терміну експлуатації електрообладнання.

Таким чином пошуки можливостей щодо зменшення впливу частотно-регульованого привода на якість електроенергії в електромережах промислових підприємств є важливою та актуальною

задачею.

### III. МЕТА РОБОТИ

**Метою роботи** є імітаційне моделювання різних варіантів побудови внутрішньоцехових систем електропостачання й порівняльна оцінка на його основі коефіцієнтів спотворення синусоїдальної кривої напруги у кожному конкретному випадку використання частотно-регульованого електропривода.

### IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ І АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Дослідження впливу ЧРП на якість електричної енергії доцільно реалізовувати в сучасних математичних програмних пакетах. При цьому значно скорочуються витрати на проведення безпосереднього чисельного експерименту, оскільки параметри моделі уточнюються ще в ході комп'ютерного моделювання [4]. Оцінку коефіцієнта спотворення синусоїдальної кривої напруги зручно проводити за допомогою швидкого алгоритму обчислення дискретного перетворення Фур'є (FFT Analysis).

Дискретне перетворення Фур'є базується на математичному принципі розкладання сигналу на синусоїдні та несинусоїдні складові з різними частотами у вигляді нескінченної суми. Функція отримана таким чином називається перетворенням Фур'є. Для обчислення результату перетворення

застосовують спектральний метод та алгоритми швидкого перетворення Фур'є:

$$U_{II} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S(\omega)K(\omega)e^{j\omega\tau} d\tau;$$

де  $S(\omega)$  - спектр сигналу,

$K(\omega)$  - передатна функція ланцюга, що інтегрується.

Для порівняння та оцінки коефіцієнта спотворення синусоїдальної кривої напруги у внутрішньоцеховій мережі із споживачами, що використовують частотно-регульований привод була розроблена імітаційна модель. Вона складається з джерела змінного трифазного струму, знижувального трансформатора, електроспоживачів з індивідуальними частотно-регульованими приводами до складу яких входять некеровані діодні мости, ланка постійного струму, генератори ШІМ-імпульсів, та інвертори (рис. 1). Трифазний змінний струм випрямляється за допомогою діодного моста. У ланці постійного струму пульсації напруги компенсуються за допомогою LC-контур. Випрямлений та скомпенсований струм подається на інвертор, де за допомогою керуючих ШІМ-імпульсів перетворюється на змінний заданої частоти і передається на асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором.

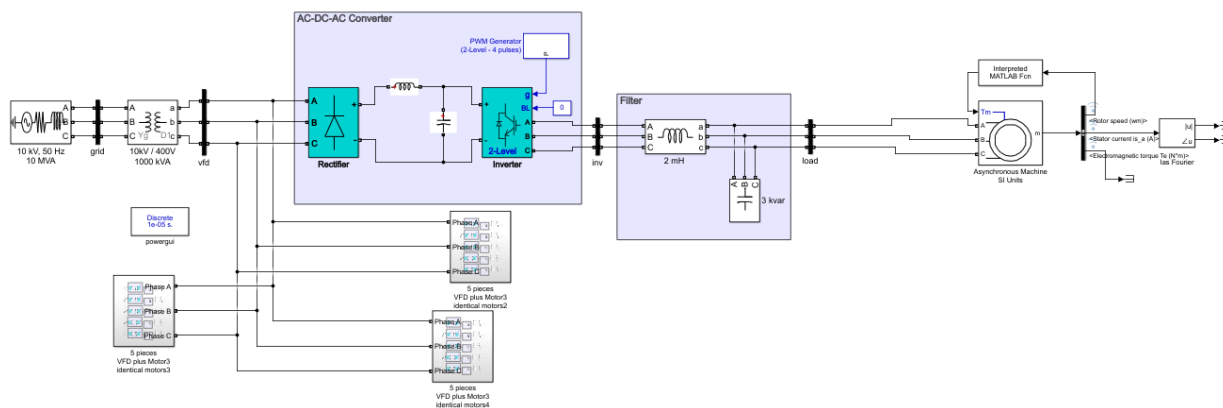


Рисунок 1. Імітаційна модель фрагмента системи електропостачання з індивідуальними ЧРП

В результаті проведених розрахунків отримані осцилограми струмів і напруг до яких в подальшому був застосований алгоритм швидкого перетворення Фур'є (рис. 2, рис. 3). Отримані під час моделювання результати показали, що при використанні індивідуальних частотно-регульованих приводів коефіцієнт спотворення синусоїдальної кривої напруги  $K_U$  (THD) складає 2.30 %. В спектральному складі переважають 5-та, 7-ма, 11-та та 13-та гармоніки, що характерно для 6-ти пульсного випрямляча.

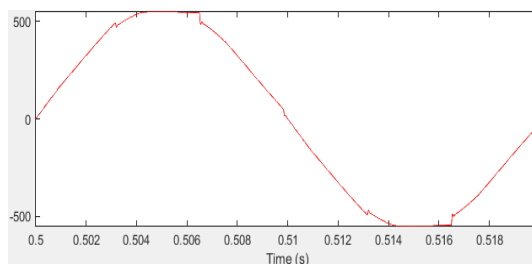


Рисунок 2. Форма кривої напруги для моделі з індивідуальними ЧРП.

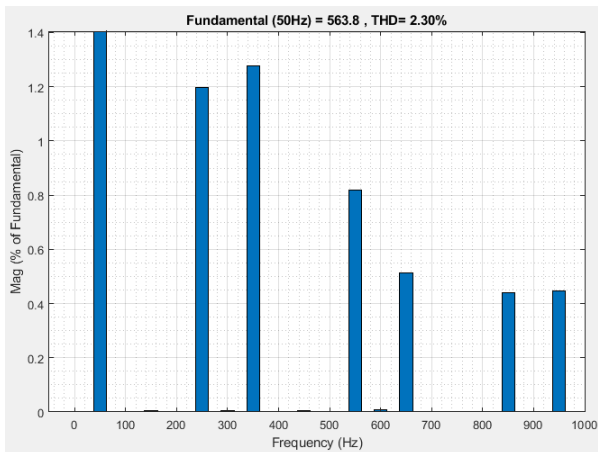


Рисунок 3. Спектральний аналіз складових напруги для моделі з індивідуальними ЧРП.

Розглянемо другий варіант системи електропостачання, в якому замість індивідуальних ЧРП застосовується загальний випрямляч, лінія постійного струму та індивідуальні інвертори для кожного споживача електричної енергії. Такий підхід до формування внутрішньоцехової мережі електропостачання дозволяє знизити кількість напівпровідникових елементів і, відповідно, покращити електромагнітну сумісність. Імітаційна модель такого варіанта системи електропостачання показана на (рис. 4.)

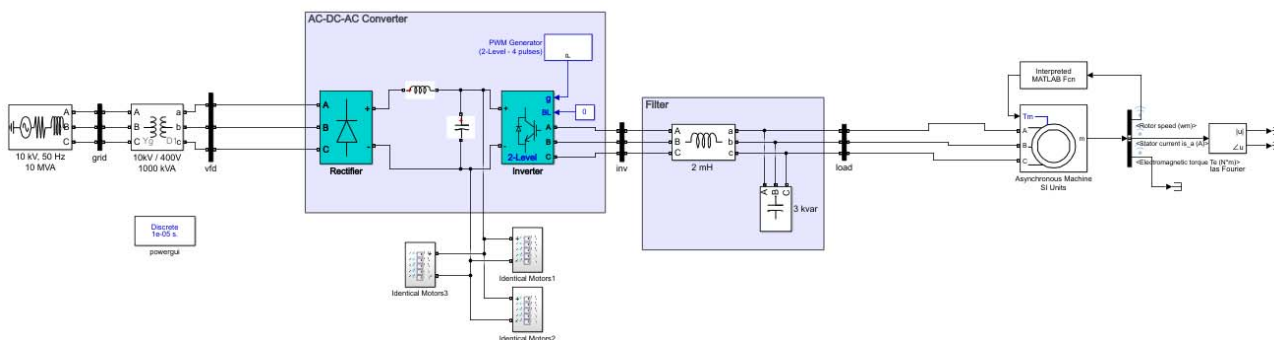


Рисунок 4. Імітаційна модель фрагмента системи електропостачання із загальним випрямлячем та індивідуальними інверторами

Результати розрахунків щодо такої системи представлені на рисунках 5 - 6. Коефіцієнт спотворення синусоїдальної кривої напруги KU (THD) у цьому випадку склав 1.77 %. Таким чином, зменшення кількості напівпровідникових елементів в системі електропостачання дозволило знизити коефіцієнт спотворення синусоїдальної кривої напруги на 23 %. В спектральному складі майже відсутні вищі гармонічні складові окрім 5-ї та 7-ї.

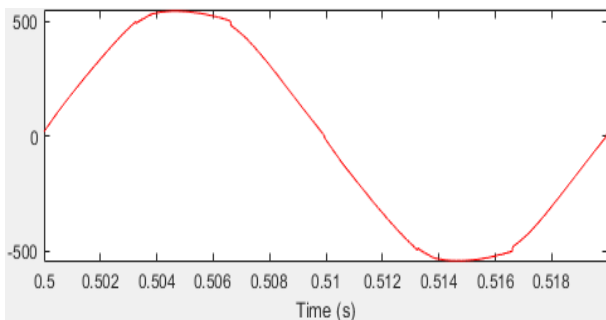


Рисунок 5. Форма кривої напруги для моделі із загальним випрямлячем та індивідуальними інверторами

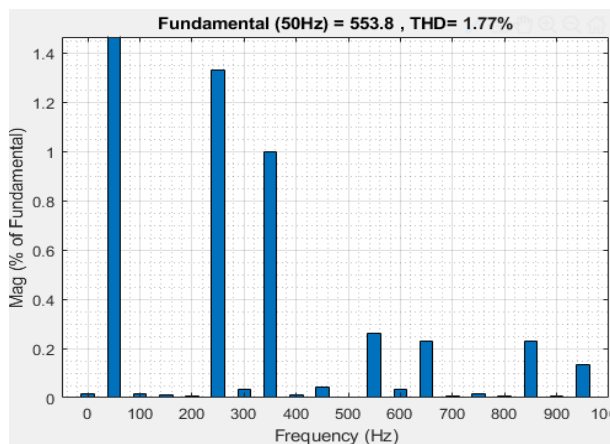
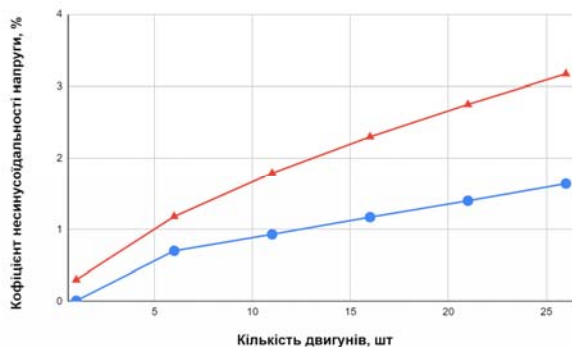


Рисунок 6. Спектральний аналіз складових напруги для моделі із загальним випрямлячем та індивідуальними інверторами.

Для оцінки впливу кількості приймачів ЕЕ з ЧРП на коефіцієнт несинусоїдальності напруги було змодельовано режими роботи з різною кількістю двигунів з частотним керуванням. В результаті розрахунків встановлено, що при збільшенні кількості приймачів ЕЕ з ЧРП, для яких може бути

застосований загальний випрямляч з лінією постійного струму, технічний ефект від запропонованого підходу зростає. Так, для 6-ти приймачів коефіцієнт спотворення синусоїдальної кривої напруги  $K_U$  (THD) зменшився на 40,68%, для 16-ти приймачів - на 49,13%, для 26-ти приймачів - на 49,26% (рис. 7)



**Рисунок 7.** Залежність коефіцієнта несинусоїдальності і напруги від кількості двигунів в системі електропостачання цеху з ПЧ(Δ) та в системі електропостачання цеху із загальним випрямлячем та індивідуальними інверторами (о)

Проведемо оцінку економічного ефекту від використання запропонованого підходу щодо формування внутрішньоцехової електромережі із

загальним випрямлячем та індивідуальними інверторами. Орієнтовна вартість, на теперішній час, пристроїв для споживачів із ЧРП та індивідуальними інверторами наведено у таблиці 1.

Незважаючи на значно меншу кількість напівпровідникових елементів в одному випрямлячі та інверторах, вартість їх у порівнянні з перетворювачами частоти не є суттєвою. Але це викликано ціновою політикою, яка залежить від попиту на ті чи інші товари. Очевидно, що у разі розповсюдження мереж із загальним випрямлячем вона зменшиться на користь перших.

Економічний ефект від заміни індивідуальних ЧРП загальним випрямлячем з індивідуальними інверторами складе

$$E = \frac{K_1 - K_2}{K_1} \cdot 100\% = \frac{416000 - 374400}{416000} \cdot 100\% = 10\%$$

Тут не врахована вартість лінії постійного струму між випрямлячем і інверторами, протяжність якої залежить від розосередженості електродвигунів по території цеху. Тож виходить, що зазначений економічний ефект є таким, до якого можна лише наблизитися. Але у будь-якому випадку побудова мережі у запропонованому вигляді, навіть тепер, не буде збитковою. А в майбутньому, без сумніву, економічно вигідною.

**Таблиця 1.** Орієнтовна вартість перетворювачів частоти, випрямляча та інверторів

Тип пристрою	Кількість, шт.	Вартість одиниці, грн	Капітальні вкладення, грн	
Перетворювач частоти	26	16 000	416 000	416 000
Випрямляч	1	124 800	124 800	374 400
Інвертор	26	9 600	249 600	

## V. ВИСНОВКИ

1. Розроблені імітаційні моделі роботи цехової мережі дозволяють досліджувати показники якості електричної енергії як в стаціонарних, так і в перехідних режимах роботи.

2. Використання загального некерованого випрямляча у поєднанні з загальною шиною постійного струму та індивідуальними інверторами позитивно впливає на якість електричної енергії в цеховій мережі. При цьому коефіцієнт спотворення синусоїдальної кривої напруги  $K_U$  (THD) зменшується на 23%.

3. Економічний ефект від використання запропонованого підходу щодо формування внутрішньоцехових електромереж залежить від

ступеню розосередженості двигунів і у найкращому випадку може наблизитися до 10%. Очевидно, що при поширенні таких мереж економічний ефект буде значно більшим.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Егоров А.Б., Харитонов Я.М., Шевчук В.А., (2020). Влияние высших гармоник на работу преобразователя частоты в условиях подземного рудника. 331 141-151. DOI: 10.18799/24131830/2020/6/2683
- [2] Исаева Т.М. (2016) О результатах исследования высших гармоник на высоковольтной подстанции Главный энергетик., 11, 32–35.
- [3] Качан Ю.Г., Шрам О.А., (2022) Щодо доцільних обсягів якісної енергії в електромережах

- підприємств. Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету (технічні науки), 1. 121–131. DOI:10.31319/2519-2884.40.2022.15.
- [4] Авербух М.А. (2014) Анализ электродинамических процессов и электромагнитной совместимости частотного электропривода в пакете MATLAB 7.12 Известия высших учебных заведений. Электромеханика, 4. 57–62.
- [5] He, Zhiwei & Zhou, Guangyan & Gao, Mingyu. (2013). An Improved Variable-Frequency Drive Based on Current Tracking. TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering. 11. 10.11591/telkomnika.v11i11.3508.
- [6] Иванова В.Р. (2019) Частотно-регулируемый электропривод для энергосбережения и оптимизации технологических процессов в электромеханических комплексах. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики Т. 21, 5. – С. 59–70. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2019-21-5-59-70>
- [7] Абрамов Б.И., Коган А.И., Бреслав Б.М. и др. (2009) Частотно-регулируемый электропривод буровых установок БУ-4200/250. Электротехника. М.: Издательство. Фирма Знак №1, 8- 13.
- [8] Бабакин В.И. (2014) Энергосберегающий частотно-регулируемый электропривод кустовой насосной станции. Электротехника: сетевой электронный научный журнал – Т. 1, 2 21–25 .
- [9] Глоба М.Д. (2016) Разработка программного комплекса для дистанционного управления частотным электроприводом. Научно-образовательный потенциал молодежи в решении актуальных проблем XXI века 4, 204-206.
- [10] Иванова В.Р. (2019) Исследование работоспособности асинхронных электродвигателей совместно с преобразователем частоты. Материалы 1 Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы и перспективы развития электроэнергетики и электротехники» 283-286.
- [11] Sharygin G.S., Sharygina L.I. (2015) Siberian electronics and cultural progress in the east Russia during the last century. ICONTEC/IEEE International History of High-Technologies and their Socio-Cultural Contexts Conference (HISTELCON). Tel-Aviv, Israel, 18–19 August, 2015. pp. 1–4. DOI:10.1109/HISTELCON.2015.7307319
- [12] Пугачева Э.Е., Степанов В.М., Иванов А.С., Нусратов П.Р., Букарев А.А. (2018) Усовершенствованный электропривод шахтных установок с возможностью рекуперации электроэнергии. Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 6, 412-418.
- [13] Фашиленко В.Н., Решетняк С.Н. (2016) Энергоэффективный резонансный режим электромеханических систем органов резания горных машин на базе современных структур управления. Горное оборудование и электромеханика, 4 (122) 41–45.
- [14] Харитонов Я. С., Бебихов Ю.В., Егоров А.Н. (2019) Сопоставление и анализ результатов контроля качества электроэнергии в системах электроснабжения горных предприятий. Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований 4, 54-59.
- [15] Abramov B.I. (2016) Instrumental research of electric power quality in oil fields in conditions of wide application of frequency – controlled drives // Oil industry, vol.1, pp. 90-92.
- [16] Плехов А.С., Титов Д.Ю., Шевырев Ю.В., Шевырева Н.Ю. (2018) Управление качеством электроэнергии слабых сетей посредством выпрямителя напряжения. Интеллектуальная электротехника, 1, 101-111. DOI 10.46960/2658-6754\_2018\_1\_101.
- [17] Luchinin V., Afanasjev A., Ilyin V., Korlyakov A., Petrov A. (2017) Family of micro switches based on silicon carbide for extreme conditions and duty. 11th International Workshop on the Electromagnetic Compatibility of Integrated Circuits (EMCCompo). St. Petersburg, Russia, pp. 97–99. DOI: 10.1109/EMCCompo.2017.7998089
- [18] Костыгов А.М., Кичкин А.В., Артемов С.А. (2015) Автоматизированная система удаленного энергомониторинга подвижных объектов с электроприводом. Электротехника, 11, 48-50.

*Стаття надійшла до редакції 01.10.2022*

## POSSIBILITIES TO REDUCE THE IMPACT OF VFD ON THE QUALITY OF ELECTRIC POWER IN THE NETWORKS OF ENTERPRISES AND THE COST OF ITS USE

KACHAN YU.G. Sci.D, Professor, Professor of the Department of Power Supply of Industrial Enterprises, Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: [kachan@zntu.edu.ua](mailto:kachan@zntu.edu.ua);

SHRAM O.A. Ph.D, Associate Professor, Head of the Department of Power Supply of Industrial Enterprises of the Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine,

e-mail: alexshrum@yahoo.com;

**SVERHUN A.V.** Graduate student of the Department of Power Supply of Industrial Enterprises of the Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: temas2517@gmail.com

**Purpose.** Simulation modeling of internal power supply systems and comparative assessment on its basis of the total distortion coefficients of the sinusoidal voltage curve.

**Methodology.** Methods of simulating modeling of internal power supply systems. Numerous methods for processing the obtained results. Methods for calculating the discrete Fourier transform.

**Findings.** To increase the level of automation of technological processes in industrial electrical installations, frequency converters are widely used. Together with all the advantages of using a variable frequency drive, it leads to a distortion of the sinusoidal shape of the voltage graph. The article evaluates the total distortion factor of the sinusoidal voltage curve for two options for constructing an internal network of an industrial enterprise. The proposed solution makes it possible to improve the shape of the voltage curve by reducing the number of non-linear semiconductor elements in the power supply system and reduce the influence of higher harmonic components on the power grid. At the same time, this makes it possible to reduce the cost of using VFD at the enterprise.

**Originality.** Through experimental research, it has been established that the use of a common rectifier in combination with a common DC bus and individual inverters can reduce the total distortion coefficient of the sinusoidal voltage curve.

**Practical value.** The developed simulation models of the workshop network's operation make it possible to study the indicators of the electric energy quality both in stationary and in transient modes of operation.

**Keywords:** variable frequency drive; quality of electrical energy; the total distortion factor of the sinusoidal voltage curve; internal power supply systems; cost of using VFD.

## REFERENCES

- [1] Egorov A.B., Haritonov Ja. M., Shevchuk V. A., Semenov A.Ju., (2020). Vliyanie vysshih garmonik na rabotu preobrazovatelja chastoty v usloviyah podzemnogo rudnika [The influence of higher harmonics on the operation of a frequency converter in an underground mine.]. 331 141-151 (in Russian). DOI: 10.18799/24131830/2020/6/2683
- [2] Isaeva T.M. (2016) O rezul'tatah issledovanija vysshih garmonik na vysokovol'noy podstancii [On the results of the study of higher harmonics at a high-voltage substation] Glavnyj jenergetik., 11, 32–35
- [3] Kachan Ju. G., Shram O. A (2022). Shhodo docil'nyh obsjagiv jakisnoi' energii' v elektromerezhah pidpr'yemstv [Concerning expedient volumes of qualitative energy in electric networks of the enterprises]. Zbirnyk naukovykh prac' Dniprov's'kogo derzhavno-go tehničnogo universytetu (tehnični nauky), 1. 121–131 (in Ukrainian). DOI:10.31319/2519-2884.40.2022.15.
- [4] Averbuh M. A. (2014) Analiz jelektrodinamičeskikh processov i jelektromagnitnoj sovmestimosti chastotnogo jelektroprivoda v pakete MATLAB 7.12 [Analysis of electrodynamic processes and electromagnetic compatibility of a frequency electric drive in the MATLAB 7.12 package]. Izvestija vysshih uchebnykh zavedenij. Jelektromehanika, 4. 57–62 (in Russian).
- [5] He, Zhiwei & Zhou, Guangyan & Gao, Mingyu. (2013). An Improved Variable-Frequency Drive Based on Current Tracking. TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering. 11. 10.11591/telkomnika.v11i11.3508.
- [6] Ivanova V. R. (2019) Chastotno-reguliruemyj jelektroprivod dlja jenergosberezhenija i optimizacii tehnologičeskikh processov v jelektrotehničeskikh kompleksah [Frequency-adjustable electric drive for energy saving and optimization of technological processes in electrical complexes]. Power engineering: research, equipment, technology, T.21, 5. 59–70. (in Russian) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2019-21-5-59-70>
- [7] Abramov B.I, Kogan A.I., Breslav B.M, i dr. (2009) Chastotno-reguliruemyj jelektroprivod burovnykh ustanovok BU-4200/250 [Frequency-controlled electric drive of drilling rigs BU-4200/250]. Jelektrotehnika. M.: Izdatel'stvo. Firma Znak.. №1, 8-13 (in Russian)
- [8] Babakin V. I. (2014) Jenergosberegajushhij chastotno-reguliruemyj jelektroprivod kustovoj nasosnoj stancii [Energy-saving frequency-controlled electric drive of a cluster pumping station]. Jelektrotehnika: setevoj jelektronnyj nauchnyj zhurnal – T. 1, 2 21–25 (in Russian).
- [9] Globa M.D. (2016) Razrabotka programmno-go kompleksa dlja distancionnogo upravlenija chastotnym jelektroprivodom [Development of a software package for remote control of a frequency electric drive]. Nauchno-obrazovatel'nyj potencial molodezhi v reshenii aktual'nykh problem XXI veka, 4, 204-206.(in Russian)
- [10] Ivanova V.R. (2019) Issledovanie rabotosposobnosti asinhronnykh jelektrodvigatel'ej sovmestno s preobrazovatelem chastoty [Study of the performance of asynchronous electric motors together with a frequency converter]. Materialy I Vserossijskoj nauchno-praktičeskoj konferencii «Problemy i perspektivy razvitija jelektrojenergetiki i jelektrotehniki» 283-286. (in Russian)
- [11] Sharygin G.S., Sharygina L.I. Siberian electronics and cultural progress in the east Russia during the last century. (2015) ICOHTEC/IEEE International

- History of High-Technologies and their Socio-Cultural Contexts Conference (HISTELCON). Tel-Aviv, Israel, 18–19 August, 2015. pp. 1–4. DOI:10.1109/HISTELCON.2015.7307319
- [12] Pugachèva Je.E., Stepanov V.M., Ivanov A.S., Nusratov P.R., Bukarev A.A. (2018) Usovershenstvo-vannyj jelektroprivod shahtnyh ustanovok s vozmozhnost'ju rekuperacii jelektrojenergii [Im-proved electric drive of mine installations with the possibility of energy recovery]. Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tehniceskie nauki, 6 412-418 (in Russian).
- [13] Fashhilenko V.N., Reshetnjak S.N. (2016) Jenergojeffektivnyj rezonansnyj rezhim jelektromehaničeskikh sistem organov rezanija gornyh mashin na baze sovremennyh struktur upravlenija [Energy Efficient Resonance Mode of Electromechanical Systems of Mining Machine Cutting Organs Based on Modern Control Structures]. Gornoe oborudovanie i jelektromehaničeska. 4 (122) 41–45 (in Russian).
- [14] Haritonov Ja.S., Bebihov Ju.V., Egorov A.N. (2019) Sopostavlenie i analiz rezul'tatov kontrolja kachestva jelektrojenergii v sistemah jelektrosnabzhenija gornyh predprijatij [Comparison and analysis of the results of power quality control in power supply systems of mining enterprises]. Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyh i fundamental'nyh issledovanij, 4. 54-59.(in Russian)
- [15] B.I. Abramov. Instrumental research of electric power quality in oil fields in conditions of wide application of frequency – controlled drives // Oil industry, vol.1, pp. 90-92, 2016.
- [16] A. S. Plehov, D. Ju. Titov, Ju. V. Shevyrev, N. Ju. Shevyreva (2018) Upravlenie kachestvom jelektrojenergii slabyh setej posredstvom aktivnogo vyprjatelja naprjazhenija [Power quality control of weak grids with Active Front End]. Intelektual'naja jelektrotehnika, 1, 101-111 (in Russian) DOI 10.46960/2658-6754\_2018\_1\_101.
- [17] Luchinin V., Afanasjev A., Ilyin V., Korlyakov A., Petrov A. Family of micro switches based on silicon carbide for extreme conditions and duty. (2017) 11th International Workshop on the Electromagnetic Compatibility of Integrated Circuits (EMCCompo). St. Petersburg, Russia, pp. 97–99. DOI: 10.1109/EMCCompo.2017.7998089
- [18] Kostygov A.M., Kychkin A.V., Artemov S.A. (2015) Avtomatizirovannaja sistema udalennogo jenergomonitoringa podvizhnyh objektov s jelektroprivodom [Automated system for remote energy monitoring of moving objects with an electric drive]. Jelektrotehnika, 11 48-50. (in Russian).