



*Науковий журнал*

# ЕЛЕКТРОТЕХНІКА та ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА

№2'2020

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

*Виходить 4 рази на рік*

Запоріжжя

2020

Головний редактор д-р техн. наук  
Яримбаш Д.С.  
Заст. гол. редактора д-р техн. наук  
Тіховод С.М.  
Відповідальний  
секретар канд. техн. наук  
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.)*

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; **Міліх 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.

*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.

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, національний університет "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 22.06.2020 за рекомендацією вченої ради національного університету "Запорізька політехніка" (протокол №5/20 від 10.06.2020 р.). Формат 60x84/8. Ум. Др. Арк. 5,81. Тираж 300 прим. Зам. №608

ZAPORIZHZHIA POLYTECHNIC NATIONAL UNIVERSITY

---



*Scientific journal*

# **ELECTRICAL ENGINEERING & POWER ENGINEERING**

**№2'2020**

*Founded by Zaporizhzhia Polytechnic National University in May 1999*

*4 issues per year*

Zaporizhzhia

2020

<i>Editor-in-chief</i>	Prof., Sc.D. Dmitro Yarymbash
<i>Associate Editor-in-chief</i>	Assoc. prof., Sci.D., Sergiy Tihovod
<i>Senior secretary</i>	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)*

## 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 Uberlândia, 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. Zhylytsov**, 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., Khmelnytsky 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;

*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 Resource 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.

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 22, 2020 on the recommendation of the academic council of the Zaporizhzhia Polytechnic National University (Protocol No. 5/20 dated June 10, 2020). Sheet size 60x84/8. Cond. Print. Sheets 5,81. Number of copies printed 300. Rep. №608

# ЗМІСТ

## I ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

***Бородай В.А., Ковальов О.Р., Нестерова О.Ю.***

Параметричне керування ефективністю асинхронного приводу засобами перетворювача з підвищеним коефіцієнтом потужності.....8

***Зіновкін В.В., Близняков О.В.***

Дослідження впливу несинусоїдальних навантажень на роботоспроможність контактів пристроїв РПН.....17

***Паталах Д.Г., Тиховод С. М.***

Метод розрахунку усталених процесів в електричних колах.....24

***Підлісний О.С., Луцин С.П.***

Методи розрахунку втрат потужності силового трансформатора.....32

## II ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА

***Власенко Р.В., Бялобржеський О.В.***

Вплив нелінійного навантаження на автономну електричну мережу при паралельній роботі силового активного фільтра.....40

# CONTENTS

## I ELECTRICAL ENGINEERING

*Borodai V.A., Kovalov O.R., Nesterova O.Yu.*

Parametric control of efficiency of asynchronous drive by means of converter with the increased power factor.....8

*Zinovkin V.V., Blyzniakov O.V.*

Research of the non-sinusoidal loads impact on the operability of tap-changers contacts .....17

*Patalakh D., Tykhovod S.*

Method of calculation of steady-state processes in electrical circuits.....24

*Pidlisniy O.S., Lushchin S.P.*

Improvement of the evaluation method of calculation of power losses in power transformer.....32

## II POWER ENGINEERING

*Vlasenko R.V., Bialobrzheskyi O.V.*

The influence of nonlinear load on the autonomous electrical network at parallel work of the active power filter.....40

# СОДЕРЖАНИЕ

## I ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

***Бородай В.А., Ковалёв А.Р., Нестерова О.Ю.***

Параметрическое управление эффективностью асинхронного привода средствами преобразователя с повышенным коэффициентом мощности.....8

***Зиновкин В.В., Близняков А.В.***

Исследование влияния несинусоидальных нагрузок на работоспособность контактов устройств РПН.....17

***Паталах Д.Г., Тиховод С. М.***

Метод расчета установившихся процессов в электрических цепях.....24

***Пидлисний О.С., Луцин С.П.***

Методы расчета потерь мощности силового трансформатора.....32

## II ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

***Власенко Р.В., Бялобржеский А.В.***

Влияние нелинейной нагрузки на автономные электрические сети при параллельной работе силового активного фильтра.....40

УДК 621-926

## ПАРАМЕТРИЧНЕ КЕРУВАННЯ ЕФЕКТИВНІСТЮ АСИНХРОННОГО ПРИВОДУ ЗАСОБАМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧА З ПІДВИЩЕНИМ КОЕФІЦІЄНТОМ ПОТУЖНОСТІ

**БОРОДАЙ В.А.** канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електропривода Національного ТУ «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна, e-mail: Boroday\_va2@ukr.net;  
**КОВАЛЬОВ О.Р.** інженер, старший викладач кафедри електроенергетики Національного ТУ «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна, e-mail: kovalov.o.r@nmu.one;  
**НЕСТЕРОВА О.Ю.** канд. пед. наук, доцент, доцент кафедри перекладу Національного ТУ «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна, e-mail: olnesterova1@rambler.ru.

**Мета роботи.** Розробка схемного рішення та обґрунтування параметрів системи керування і силової частини перетворювача напруги живлення, за умов його експлуатації з підвищеним коефіцієнтом потужності і плавного або ступеневого способів регулювання енергоефективності асинхронного приводу.

**Методи досліджень.** Для проведення досліджень використані положення теорії електричних машин, методи схематичного проектування автоматичних систем у компоненті Multisim із складу електронної лабораторії National Instruments, математичне моделювання у пакеті Matlab.

**Отримані результати.** Розроблено та побудовано цифрові моделі системи імпульсно-фазового керування для ступеневого і плавного регулювання напруги живлення двигуна із залученням способу широтно-імпульсної модуляції мережної напруги, надано рекомендації щодо рівня просідання навантаження, за якого потрібно зменшити напругу живлення, і її величина при релейному керуванні, а також випробувано систему плавного керування з координатно-фазовим управлінням шпаруватості для досягнення раціональної енергоефективності привода.

**Наукова новизна.** Обґрунтовано вибір межі перемикання релейного регулятора та рівень раціональної величини вихідної напруги перетворювача за якої досягається раціонально-енергоефективне керування приводом, запропоновано алгоритм визначення параметрів RC фільтруючого кола задля одночасного забезпечення найкращих умов комутації силових ключів перетворювача та здійснення безперервної компенсації реактивної потужності двигуна за умов експлуатації перетворювача із підвищеним коефіцієнтом потужності.

**Практична цінність.** Впровадження спрощеної системи перетворення із підвищеним коефіцієнтом потужності дозволить створити автоматичну систему асинхронного привода, завдяки якій можливо досягти збереження енергоресурсу на ланках двигуна, перетворювача та енергосистеми, за умов мінімальних капітальних вкладень на її виготовлення.

**Ключові слова:** тривалий режим роботи; мало-змінний графік навантаження; енергоефективне управління приводом; спрощена схема перетворювача мережної напруги; підвищений коефіцієнт потужності.

### I. ВСТУП

Відомо, що переважна більшість існуючих промислових електроприводів будуються на базі традиційних асинхронних двигунів (АД), які завдяки відносно простій конструкції мають достатню надійність за одночасної невисокої енергоефективності у порівнянні із іншими електромеханічними системами. Зазвичай їх номінальний електричний ККД коливається у межах 70–92 % при коефіцієнті потужності 0,8–0,92, а його енергетичний ККД не перевищує 82 % [1]. Як наслідок, до 44 % споживної енергії витрачається на розігрів обмоток, елементів основної конструкції та розсіювання у навколишнє середовище потоків, що створюються електромагнітною системою асинхронного двигуна.

Методи сучасного підвищення ефективності асинхронних електроприводів передбачають створення систем «перетворювач частоти – асинхронний дви-

гун» (ПЧ–АД) або «тиристорний регулятор напруги – асинхронний двигун» (ТРН–АД). Остання система, за відсутності вимоги регулювання швидкості і з точки зору капітальних вкладень на керуєме обладнання, має значну перевагу. Хоча слід підкреслити, що використання фазового способу управління мережною напругою зменшує коефіцієнт потужності тиристорного перетворювача і відповідно додає витрат енергії на ланці перетворення, що є неприпустимим.

Активно-індуктивний характер навантаження двигуна передбачає генерування у мережу реактивної потужності, що стає причиною її перевантаження і відповідно зростання витрат і на цій ланці енергосистеми.

Таким чином, основні проблеми на які слід спрямувати дослідження, – це безперервна компенсація реактивного опору двигуна, пошук більш досконалого схемного рішення та способу керування перетворювача напруги, який володіє високою енергети-



кою за умови прийнятної вартості на керуюче обладнання.

## II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Світова енергетична стратегія останніх років спрямовувалась на впровадження технологій ощадності, у тому числі й в електромеханіці [2]-[4]. Зважаючи на це, розробниками електричного привода застосовуються різноманітні способи реалізації таких прагнень. До них слід віднести:

- використання методів підтримки економічної роботи механізмів тривалого режиму роботи шляхом стабілізації середнього коефіцієнта навантаження двигуна на рівні не менше 0,6 відносних одиниць [5], що за хаотичної зміни виробничої задачі не завжди можливо;

- залучення двигунів із підвищеним вмістом активних матеріалів [6], що дозволяє підвищити їх ККД не менше, як на 3-5 %. Хоча у цьому випадку розрахункова економія матиме місце тільки у разі мало-змінного навантаження і правильно налагодженого силового каналу;

- зниження мережних витрат централізованими фільтро-компенсуючими пристроями. Проте слід зауважити, що таким способом забезпечити сучасні вимоги до точності відпрацювання поставленої задачі фільтрації досить складно;

- перемикання схеми включення двигуна з трикутника на зірку на термін режимів холостого ходу або незначного завантаження [7]. Спосіб хоча і дає позитивний результат, але не дозволяє виконати раціональну наладку системи для створення найкращих умов енергозбереження;

- способи регулювання електропривода за допомогою силових перетворювачів [8]-[10] вважаються найбільш дієвими з точки зору енергоощадності. Але беручи до уваги те, що для механізмів тривалого режиму роботи [11], [12] використання частотного перетворювача досить дороге, є логічним впровадження на його місце тиристорних регуляторів напруги, як прийнятної альтернативи;

- використання комбінованого способу підвищення енергоефективності, наприклад, реалізація системи вентиляції локомотива [13], де частотне керування приводу вентилятора доповнюється підбором двигуна із зниженим значенням активно-реактивного опору ротора, адаптована до локомотивної енергосистеми і не завжди може бути застосована до інших промислових електромеханічних систем;

- залучення індивідуальних фільтро-компенсуючих пристроїв локального типу [1], що дозволяють розвантажити мережу і частково заощадити потужність живлення у двигуні, чого за нинішніх умов господарювання недостатньо;

- розробку сучасних алгоритмів керування частотних електроприводів провідних світових виробників [14], [15], що вирішують проблему енергоощадності але не знімають питання значних

початкових капітальних витрат на керуюче обладнання;

- синтез регуляторів для вирішення раціонального живлення привода в залежності від рівня навантаження [16]. На жаль, використання в системі керування напругою тиристорного регулятора не дозволяє знизити витрати енергії у перетворювачі, що є неприйнятним недоліком;

- залучення систем перетворення із підвищеним ККД, які базуються на принципах широтно-імпульсної модуляції керуючого сигналу [17]. Така система має досить складне схемне рішення, що відповідно стане причиною її високої вартості, а крім цього у роботі недостатньо приділяється уваги комутації ключів на активно-реактивне навантаження.

Із огляду можливо зробити наступний висновок, що для реалізації більш дієвої та доступної системи керування електромеханічної системи із тривалим режимом роботи, слід залучати регулятори напруги із спрощеною схемою керування і принципом широтно-імпульсної модуляції з урахуванням питань одночасної локальної компенсації реактивної потужності та вирішення питань комутації керуючих ключів.

## III. МЕТА РОБОТИ

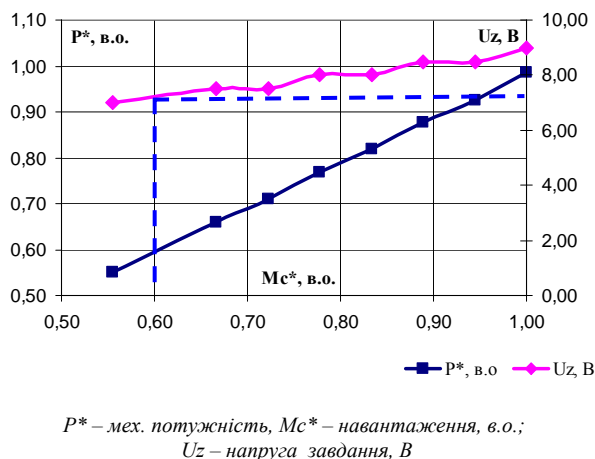
Розробка схемного рішення та обґрунтування параметрів системи керування і силової частини перетворювача напруги живлення за умови його експлуатації з підвищеним коефіцієнтом потужності і плавного або ступеневого способів регулювання енергоефективності асинхронного привода.

## IV. ВИКЛАД ГОЛОВНОГО МАТЕРІАЛУ Й АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

**Обґрунтування параметрів регулювання напруги.** Виходячи із попереднього висновку витікає, що головна задача даної роботи полягає у розробці системи автоматичного регулювання, яка у режимі реального часу забезпечить на клеммах АД живильну потужність рівня, необхідного для подолання поточного навантаження двигуна. Із аналізу літературних джерел і за умови фінансової доступності системи впливає, що реалізація поставленої мети можлива у випадку використання ступеневого способу управління електроприводом.

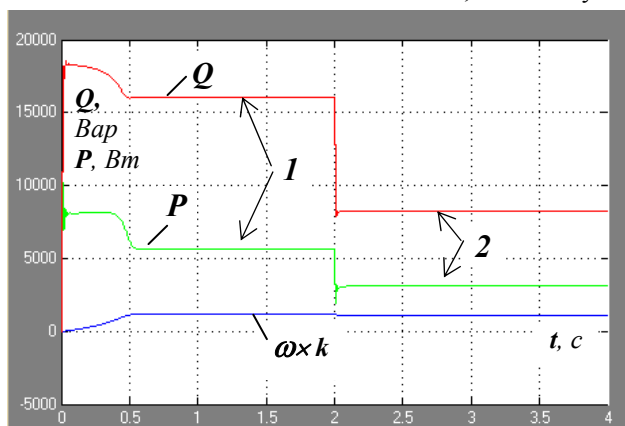
Авторами пропонується розробка двохступеневої системи, яка працює або у номінальному режимі, або у режимі енергозбереження. Слідуючи Європейському досвіду, де привод електромеханічних систем тривалого режиму роботи експлуатують при навантаженні, що не менше за 60 % від номінального значення, слід обрати межу перемикання релейного регулятора саме на цьому рівні. Тобто, в інтервалі навантажень 1...0,6 номінального напруга живлення становить номінал, а якщо воно знижується менше ніж 0,6, система прибирає напругу до величини, що забезпечить раціональну ефективність АД.

Для визначення раціонального значення вихідної напруги у режимі перемикання перетворювача скористаємось матеріалом джерела [16]. Так, для двигуна 4A132M8У3 встановленої потужності 5,5 кВт, номінальної швидкості обертання 750 об/хв, напруги живлення 220 В отримано залежності (рис.1), з яких



**Рисунок 1.** До визначення раціональної вихідної напруги перетворювача

слідє, що при навантаженні у 60 % номінального завдання на вході перетворювача становить 7,2 вольт. Тобто, напруга перетворення, у цьому випадку, повинна становити 72 % вихідної номінальної, якщо прийняте максимальне вхідне значення напруги управління коливається у межах  $\pm 10$  вольт. Експериментальна перевірка працездатності запропонованого налаштування динамічної моделі демонструє (рис.2) зниження активної потужності на 44 %, а реактивної на 49 % за незмінного навантаження в 0,6 номіналу.

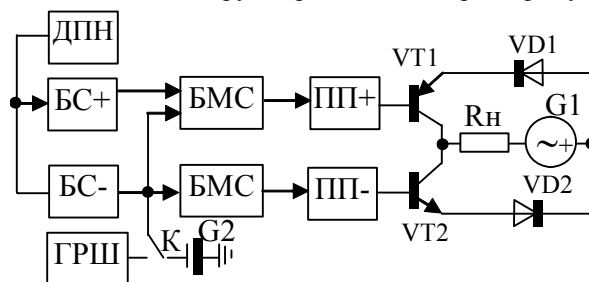


$P$  – активна та  $Q$  – реактивна потужності;  
 $\omega$  – кутова швидкість;  $k=15$  – масштабний коефіцієнт

**Рисунок 2.** Дослідження сталого режиму АД за номінальної – 1 та зниженої – 2 напруги

**Підхід до побудови схеми перетворення.** Як відомо, суттєвим недоліком тиристорних регуляторів напруги із фазовим регулюванням є низький коефіцієнт потужності. На відміну від них, ШІМ перетворювачі мають кращі енергетичні показники, але їх суттєва конструктивна складність і відповідно висока вартість стримує розвиток цього напрямку систем електроприводу. Тому головною задачею роботи є розробка спрощеного схемного рішення ШІМ перетворювача задля регулювання енергоефективності приводу у залежності від падіння навантаження.

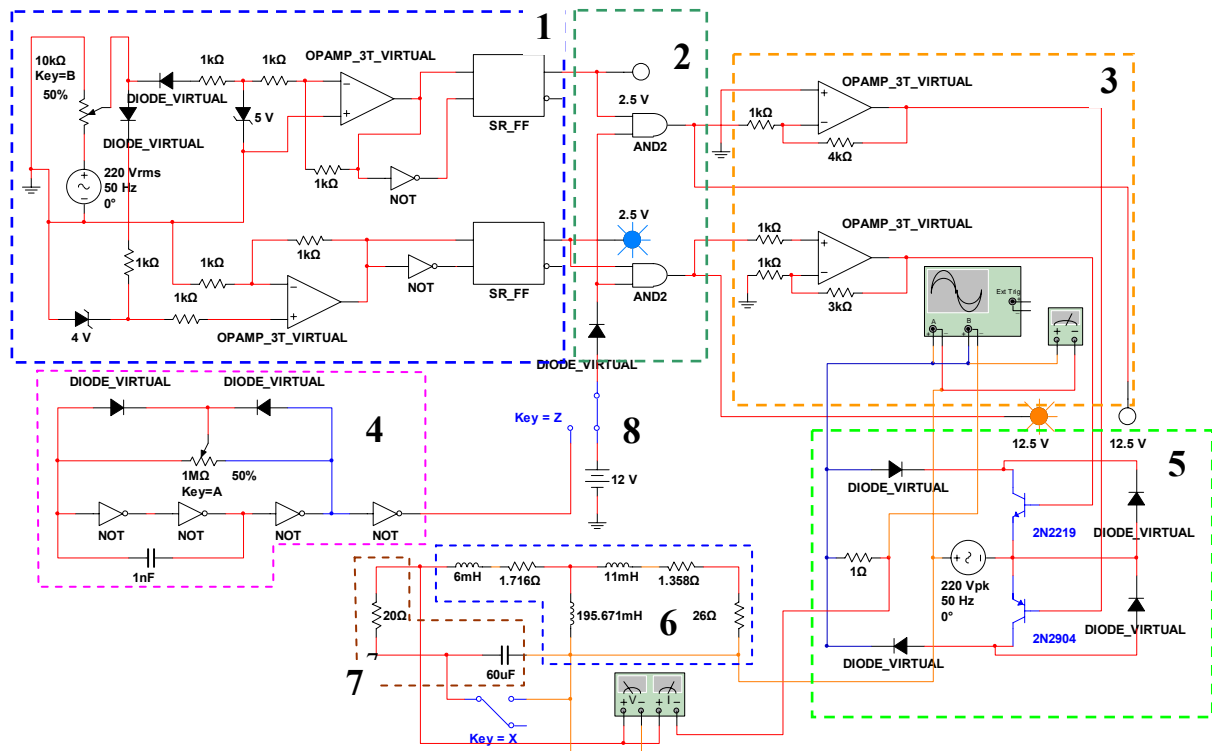
Для пояснення структури і роботи схемного рішення скористаємось функціональною схемою рис.3. Сигнал з давача напруги промислової мережі фіксу-



ДПН – давач мережної напруги; БС – блоки синхронізації; ГРШ – генератор регульованої шпаруватості;  
БМС – блок модуляції сигналу; ПП – попередній підсилювач;  $R_n$  – навантаження; VT, VD – ключі та вентилі

**Рисунок 3.** Функціональна схема ШІМ перетворювача напруги

ється блоками синхронізації БС+ позитивної і БС- негативної напівхвилі та утримується у одиничному стані протягом усієї протяжності напівперіодів напруги живлення. Пульсуюча форма сигналів керування утворюється завдяки блокам модуляції БМС, виходи з яких відповідно подаються на попередні підсилювачі ПП+ та ПП- підтягнення потужності керування до рівня достатнього для управління силовими ключами VT1, VT2. Завдяки неоднаковій провідності ключів VT1, VT2 та подачі керування у протифазі струм через навантаження  $R_n$  має синусоїдальну форму, а його регулювання здійснюється шляхом зміни шпаруватості генератора ГРШ. У нашому випадку, за ступеневого регулювання, шпаруватість одноразово налагоджується до початку роботи приводу на напругу, що визначена у попередньому підпункті, а далі користуючись релейним регулятором  $K$  здійснюють перемикання номінального режиму в положення приєднано до G2 або енергоефективного приєднано до ГРШ. Принципова схема системи імпульсно-фазового керування, реалізована засобами електронної лабораторії National Instruments складової Multisim, зображена на рис. 4. Показана схема вміщує один канал. Повний комплект у трифазному виконанні таких каналів повинен мати три, а їх синхронізація мусить здійснитись за кожною фазою окремо.



1 – синхронізація; 2 – блок модуляції; 3 – попередні підсилювачі; 4 – генератор регульованої шпаруватості; 5 – силовий блок; 6 – навантаження; 7 – ланцюг компенсації; 8 – релейний регулятор

Рисунок 4. Модель ШІМ системи ступеневого керування енергоефективністю АД

**Визначення параметрів кола компенсації навантаження.** Попереднє випробування системи перетворення (рис.4) на активне навантаження дали досить хороші результати. Регулювання напруги вдалося здійснити плавно й у широкому діапазоні. У випадку роботи перетворювача на активно-реактивне навантаження, де у якості споживача обрано схему заміщення (рис.5) асинхронного двигуна 4A100L4У3

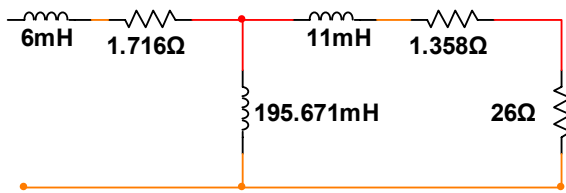


Рисунок 5. Схема заміщення АД 4A100L4У3 сталого режиму

потужності 4 кВт швидкості обертання 1000 об/хв і номінальної напруги живлення 220 вольт, виявило повну його непрацездатність, що фіксувалось у вигляді значних кидків напруги при кожному перемиканні силових ключів. При цьому експеримент здійснювався для сталого режиму за номінального ковзання  $s=0,05$ , де опір ротору розраховано за рівнянням  $r_2 \times (1-s)/s = 26 \text{ Ом}$ . Зрозуміло, що аварійна робота пе-

ретворювача пов'язана з виникненням викидів енергії, яка накопичується на індуктивностях електричної машини.

Компенсувати наслідки такого стану роботи перетворювача пропонується завдяки  $RC$  кола, що приєднується у паралель до клем живлення схеми заміщення. Визначення параметру ланки компенсації пропонується за такою послідовністю:

- згортання опоры схеми заміщення у комплексному вигляді

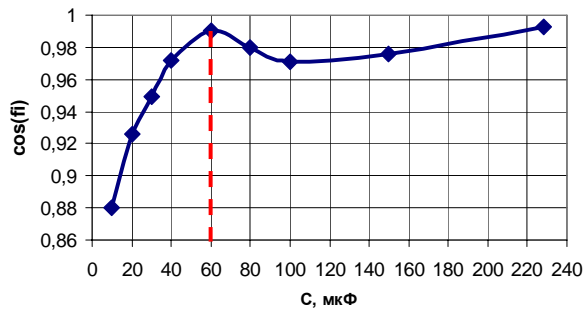
$$Z_L = 20.826 + 12.047j, \text{ Ом},$$

де  $j = \sqrt{-1}$ ;

- прирівнювання  $x_L = x_C$  і визначення з цього рівняння ємності, де активний опір залишається на рівні 20,826 Ом. При такому розрахунку ємність компенсації дорівнює 228,5 мкФ на фазу двигуна.

- визначена ємність забезпечує коефіцієнт потужності рівний майже 1, що при змінах навантаження може призвести до перекомпенсації системи. Тому на цьому етапі будується залежність коефіцієнта потужності від величини компенсуючого конденсатора, ємність якого знижують від визначеної розрахункової до рівня мінімально прийнятої, де  $\cos(\varphi) = 0,88$ ;

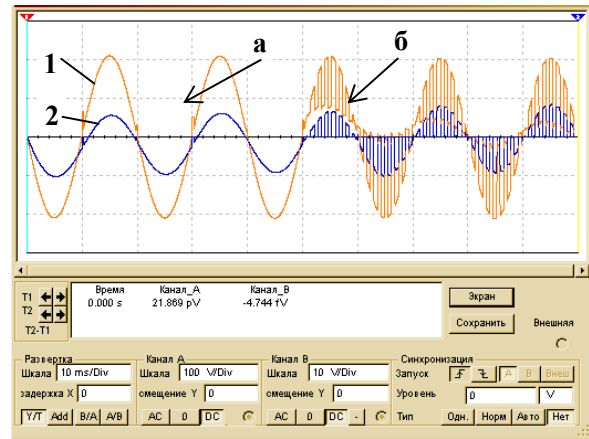
- далі за графіком залежності обирається мінімальна ємність конденсатора за раціонально обраного  $\cos(\varphi)$ .



**Рисунок 6.** Експериментальна залежність до визначення раціональної ємності

За запропонованим алгоритмом отримана залежність рис.6, з якої раціональна ємність становить 60 мкФ. При перевірці роботи перетворювача можливо спостерігати, що у режимах номінальний (рис.7, а) кидки напруги в моменти переходу з позитивного напівперіода у негативний мають допустимий рівень, а ефективний (рис.7, б) - широтно-імпульсна модуляція має вигляд майже такий, як і при роботі перетворювача на активне навантаження.

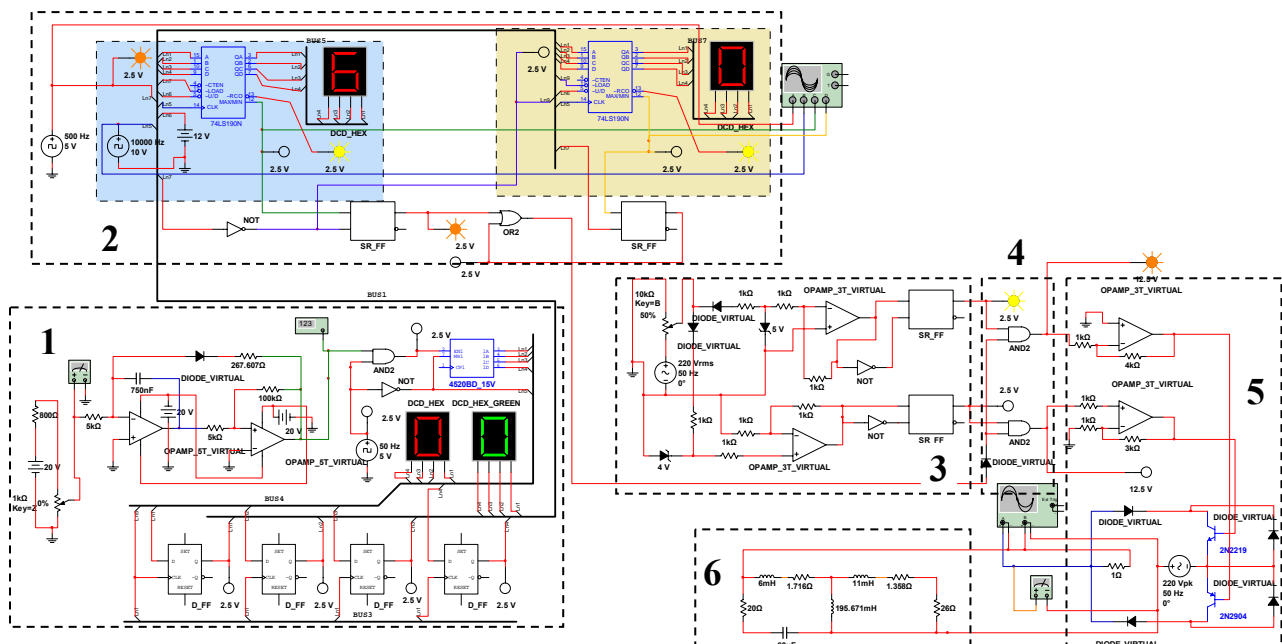
Отже, отримані залежності рис. 7 наглядно демонструють стійку роботу системи за умови надійної комутації силових ключів та підтримки  $\cos(\varphi)$  системи на рівні не гіршому за 0,987.



1 – вихідна напруга, масштаб 100 В/ділення;  
2 – струм навантаження, масштаб 10 А/ділення;  
режими а – номінальний, б – енергоефективний

**Рисунок 7.** Експериментальна залежність роботи перетворювача на реактивне навантаження

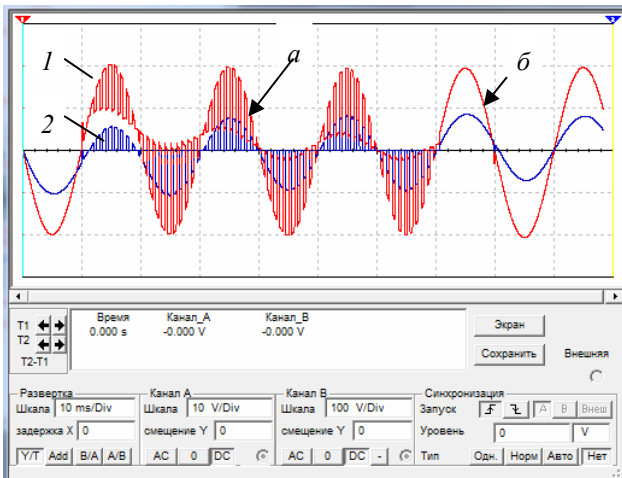
**Схемне рішення щодо плавного керування.** Проробка питання щодо більш точного відпрацювання регулювання енергоефективності асинхронного електропривода показала, що плавне управління має переваги, хоча у цьому випадку слід погодитись на складність, меншу надійність, а найголовніше - підвищену початкову вартість перетворювача. Тому для промисловців, які згодні на такі умови може бути запропонована система із координатно-фазовим регулюванням шпаруватості [18] і додатковим індивідуальним фільтро-компенсуючим пристроєм, що розроблений у цій роботі. Схемне рішення, що реалізує таку систему,



АЦП; 2 – фазові таймери; 3 – мережна синхронізація; 4 – модулятори; 5 – силовий блок; 6 – навантаження

**Рисунок 8.** Модель перетворювача із плавним регулюванням

наведене на рис.8, а його завершеність буде за наявності в системі нелінійного регулятора корекції ефективності [16] в залежності від навантаження.



– напруга, масштаб 100 В/ділення;  
– струм, масштаб 10 А/ділення;  
Режими а – регулювання; б – номінальний

**Рисунок 9.** Результати моделювання за плавного регулювання

Результуючі залежності (рис.9) випробування схеми (рис.8) не відрізняються від залежностей, які показані на рис.7, що дає підстави стверджувати, що система плавного керування працює також стійко і без проблем комутації із безперервною компенсацією реактивної потужності. При цьому коефіцієнт потужності в обох випадках залишається на рівні не гірше 0,987.

## V. ВИСНОВКИ

Умови теперішнього часу вимагають максимальної ефективності АД привода, яка може бути досягнута за створення умов миттєвої подачі в двигун такої кількості енергії, яка не перевищує необхідної для подолання поточного навантаження, використання двигунів із підвищеним ККД, компенсації реактивної потужності індивідуальними фільтро-компенсуючими пристроями та застосування перетворювачів із високим коефіцієнтом потужності.

Наріжний принцип розробки - низькі капітальні вкладення, які здійсненні за умови простоти схемного рішення систем перетворення мережної напруги. Реалізація цього можлива у випадку ступеневої системи керування перетворювача.

За сучасного розвитку перетворювальної техніки достатній коефіцієнт потужності забезпечує саме система з широтно-імпульсною модуляцією мережної напруги.

Номінальним інтервалом варіювання навантаження слід вважати від 1...0,6 номінального, що відповідає Європейському досвіду. А межа менше за 60 % номінального навантаження є прийнятною для перемикання перетворювача у режим енергозбереження.

При цьому найкраща енергоефективність двигуна досягається за вихідної напруги перетворювача в 72 % номінального.

Визначення параметрів ланцюга компенсації слід здійснювати у послідовності:

- згортання опору схеми заміщення двигуна;
- визначення ємності конденсатора із реактивної складової згорнутого опору схеми заміщення, а активну складову при цьому залишають незмінною;
- побудова залежності коефіцієнта потужності системи від ємності конденсатора за даними експерименту, де варіювання останньої здійснюється у межах від розрахункової до мінімально прийнятої за  $\cos(\varphi) = 0,88$ ;
- з графіку залежності встановлення раціональної ємності  $RC$  ланцюга, яка відповідає обраному  $\cos(\varphi)$ .

Експериментальним чином доведено стійкість обох систем керування за кращих умов комутації силових ключів та отримання коефіцієнта потужності рівня не гірше за 0,987.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Мугалимов Р.Г. Моделирование показателей энергоэффективности вариантов электроприводов промышленных установок на основе применения традиционных и компенсированных асинхронных двигателей / Р.Г. Мугалимов, А.Р. Мугалимова – Магнитогорск: Вестник МГТУ им. Г. И. Носова. – № 2 (34). – 2011. – С. 59-64.
- [2] Стратегия энергосбережения в Украине: аналитически-справочные материалы в 2-х томах. Общие основы энергосбережения / за ред. В.А. Жовтнянського, М.М. Куліка, Б.С. Стогнія – К.: Академперіодіка, 2006. – Т. 1. – 510 с.
- [3] Клепиков В.Б. О роли электропривода в решении проблемы энергоресурсосбережения в Украине / В.Б. Клепиков, В.Ю. Розов // Вестник НТУ «ХПИ»: Тем. вып. «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика». – Харьков: НТУ «ХПИ», 2010. – № 28. – С. 18–21.
- [4] Бешта О.С., Півняк Г.Г. та ін. Економічні й екологічні аспекти комплексної генерації та утилізації енергії в умовах урбанізованих територій. Монографія. / О.С.Бешта, Г.Г. Півняк та ін. – Дніпропетровськ, НГУ, 2013. – 220 с.
- [5] Козярук А.Е. Метод и средства повышения энергоэффективности машин и технологий с асинхронным электроприводом / А.Е. Козярук, Б.Ю. Васильев // Вестник ЮУРГУ. Сер. «Энергетика». – 2015. – Т.15, №1. – С. 47-53. DOI: 10.14529 / power 150106.
- [6] Новая высокоэффективная серия асинхронных двигателей 7AVE, ее модификации и специализированные исполнения / В.Я. Беспалов, А.С. Кобелев, О.В. Кругликов, Л.Н. Макаров // Труды

- VIII Междунар. (XIX Всерос.) науч.-техн. конф. по автоматизир. электроприводу. – Саранск, 2014. – С. 239-243.
- [7] Бабокин Г.И. Оценка экономии электрической энергии в нерегулируемом асинхронном электроприводе путем переключения обмоток статора // ГИАБ. 2005. №7. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-ekonomii-elektricheskoy-energii-v-nereguliruемом-asinhronnom-elektroprivode-putem-pereklyucheniya-obmotok-statora> (дата обращения: 08.07.2019).
- [8] Браславский И.Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод / И.Я. Браславский, З.Ш. Ишматов, В.Н. Поляков: под ред. И.Я. Браславского. – М.: Академия. 2004 – 256 с.
- [9] Vasilev B. Structure and three-level inverter control algorithm electric power facilities transportation of hydrocarbons / B. Vasilev // Electrotechnic and computer systems. – 2014. – № 15(91). – P. 220-223.
- [10] Kozyaruk A. Structure, composition, and control algorithms of high-efficiency electric drives of gas-compressor units / A. Kozyaruk, B. Vasil'ev // Russian Electrical Engineering. February. – 2013. – Vol. 84. – Iss.2. – P.94-102. DOI: 10.3103/S1068371213020077
- [11] Лезнов Б.С. Частотно-регулируемый электропривод насосных установок / Б.С. Лезнов— М.: Машиностроение, 2013. — 176 с.
- [12] Лезнов Б.С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздушных установках / Б.С. Лезнов. – М.: Энергоатомиздат, 2006. – 256 с.
- [13] Дзенис С.Е. Выбор асинхронного двигателя привода вентилятора тепловоза с условием обеспечения его устойчивой работы // С.Е. Дзенис, В.В. Шевченко, О.О. Ханин – Харьков: Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил, Наук. – техн. зб. – 2015 – Вип. 4(45) – С. 92-96.
- [14] Казачковский Н.Н. Сопоставление законов частотного управления на примере преобразователя частоты Altivar 21. / Н.Н. Казачковский // Гірнична електромеханіка та автоматика, Наук. – техн. зб. – 2018 – Вип. 100.– С. 69 – 72.
- [15] Бабокин Г.И. Оценка экономии энергетической энергии в системе регулятор напряжения асинхронный двигатель / Г.И. Бабокин // ГИАБ. - 2006. - №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-ekonomii-energeticheskoy-energii-v-sisteme-regulyator-napryazheniya-asinhronnyy-dvigatel-1> (дата обращения: 08.07.2019).
- [16] Бородай В.А. Спосіб синтезу регулятора енергоефективного управління асинхронним приводом механізмів без прямої стабілізації швидкості / В.А. Бородай, Р.О. Боровик, О.Ю. Нестерова // Електротехніка та електроенергетика – Запоріжжя: – 2019. – № 3.– С. 16-23. DOI 10.15588/1607-6761-2019-3-2
- [17] Горбунов Р.Л. Исследование трехфазного широтно-импульсного преобразователя переменного напряжения для повышения энергоэффективности асинхронных двигателей / Р.Л. Горбунов, Г.И. Посконный // Известия Томского политехнического университета – 2014. - Т. 324. № 4.– С. 76-86.
- [18] Бородай В.А. Широтно-импульсный регулятор с координатно-фазовым управлением скважности /В.А. Бородай, А.Р. Ковалев // Гірн. Електромеханіка та автоматика: Наук. – техн. зб. – 2015 – Вип. 95. – С 54 – 58.

Стаття надійшла до редакції 22.06.2020

## ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ АСИНХРОННОГО ПРИВОДА СРЕДСТВАМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С ПОВЫШЕННЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ МОЩНОСТИ

- БОРОДАЙ В.А.** канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электропривода Национального ТУ „Днепровская политехника”, Днепр, Украина, e-mail: Boroday\_va2@ukr.net;
- КОВАЛЁВ А.Р.** инженер, старший преподаватель кафедры электроэнергетики Национального ТУ „Днепровская политехника”, Днепр, Украина, e-mail: kovalov.o.r@nmu.one;
- НЕСТЕРОВА О.Ю.** канд. пед. наук, доцент, доцент кафедры перевода Национального ТУ „Днепровская политехника”, Днепр, Украина, e-mail: olnesterova1@rambler.ru.

**Цель работы.** Разработка схемного решения и обоснование параметров системы управления и силовой части преобразователя напряжения питания при условии его эксплуатации с повышенным коэффициентом мощности и плавного или ступенчатого способов регулирования энергоэффективности асинхронного привода.

**Методы исследования.** Для проведения исследований использованы положения теории электрических машин, методы схемотехнического проектирования автоматических систем в компоненте Multisim из состава электронной лаборатории National Instruments, математическое моделирование в пакете MatLab.

**Полученные результаты.** Разработаны и построены цифровые модели систем импульсно-фазового управления для ступенчатого и плавного регулирования напряжения питания двигателей с применением способа широтно-импульсной модуляции сетевого напряжения, даны рекомендации к уровню просадки нагрузки, при котором необходимо уменьшить напряжение питания и его величины при релейном управлении, а также испытана система плавного регулирования с координатно-фазовым управлением скважности для достижения рациональной энергоэффективности привода.

**Научная новизна.** Обоснован выбор предела переключения релейного регулятора и уровень рациональной величины выходного напряжения преобразователя, при котором достигается рационально-энергоэффективное управление приводом, предложен алгоритм определения параметров RC фильтрующей цепи для одновременного обеспечения наилучших условий коммутации силовых ключей преобразователя и осуществления непрерывной компенсации реактивной мощности двигателя, при условии эксплуатации преобразователя с повышенным коэффициентом мощности.

**Практическая ценность.** Внедрение упрощенной системы преобразования с повышенным коэффициентом мощности позволит создать автоматическую систему асинхронного привода, благодаря которой возможно достичь сбережения энергоресурса на участках двигателя, преобразователя и энергосистемы, при условии минимальных капитальных вложений на её изготовление.

**Ключевые слова:** длительный режим работы; мало меняющийся график нагрузки; энергоэффективное управление асинхронным приводом; упрощенная схема преобразователя сетевого напряжения; увеличенный коэффициент мощности.

## PARAMETRIC CONTROL OF EFFICIENCY OF ASYNCHRONOUS DRIVE BY MEANS OF CONVERTER WITH THE INCREASED POWER FACTOR

**BORODAI V.A.** Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electric Drive, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: Boroday\_va2@ukr.net;

**KOVALOV O.R.** Engineer, Senior Lecturer of the Department of Power Engineering, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: kovalov.o.r@nmu.one;

**NESTEROVA O.YU.** PhD, Associate Professor of the Translation Department, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: olnesterova1@rambler.ru.

**Purpose.** Development of circuit solution and substantiation of parameters of control system and power part of power supply converter, provided its operation with high power factor and smooth or stepwise methods of energy efficiency control of asynchronous drive.

**Methodology.** The provisions of the theory of electric machines, methods of circuit design of automatic systems in the Multisim component of the National Instruments electronic laboratory, mathematical modeling in the Matlab package were used for research.

**Findings.** Digital models of pulse-phase control systems for stepwise and smooth regulation of the supply voltage of motors using the method of pulse-width modulation of the mains voltage have been developed and built, recommendations are given for the level of load sagging, at which it is necessary to reduce the supply voltage and its magnitude with relay control, and also tested a smooth control system with coordinate-phase duty cycle control to achieve rational energy efficiency of the drive.

**Originality.** The choice of the switching limit of the relay regulator and the level of rational value of the converter output voltage is substantiated, at which rational and energy-efficient control of the drive is achieved, the algorithm for determining the RC filtering circuit parameters is proposed to ensure simultaneously the best conditions for switching the converter power switches and the implementation of continuous compensation of the engine reactive power, provided that the converter is operated with an increased power factor.

**Practical value.** The introduction of a simplified conversion system with a high power factor will create an automatic asynchronous drive system, through which it is possible to achieve energy conservation at the engine, converter and power system, with minimal capital investment in its production.

**Keywords:** Long operating mode; slightly changing load schedule; energy-efficient asynchronous drive control; simplified circuit of the mains voltage converter; increased power factor.

### REFERENCES

[1] Mugalimov, R.G. (2011). Modelirovanie pokazatelej jenergojeffektivnosti variantov jelektroprivodov promyshlennyh ustanovok na osnove primenenija

tradicionnyh i kompensirovannyh asinhronnyh dvigatelej [Modeling of energy efficiency indicators of electric drive options of industrial plants based on the use of traditional and compensated asynchronous mo-

- tors]. *Bulletin of MSTU. G. I. Nosova*, 2 (34), 59-64. (in Russian)
- [2] Zhovtnyansky, V.A., Kulik, M.M., Stogniya, B.S. (2006). Strategija jenergosberezhenija v Ukraine: analiticheskopravochnye materialy v 2-h tomah. Obshhie osnovy jenergosberezhenija [Energy saving strategy in Ukraine: analytical and reference materials in 2 volumes. General principles of energy saving]. *Academiperiodic*, 1, 510.
- [3] Klepikov, V.B., Rozov, V.Yu. (2010). O roli jelektroprivoda v reshenii problemy jenergoresursosberezhenija v Ukraine [On the role of the electric drive in solving the problem of energy saving in Ukraine]. *Bulletin of NTU "KPI": issue "Problems of an automated electric drive. Theory and practice"*, 28, 18-21.
- [4] Beshta, O.S., Pivnyak, G.G., etc. (2013). Ekonomichni j ekologichni aspekty kompleksnoi' generacii' ta utylizacii' energii' v umovah urbanizovanyh terytorij. Monografija [Economic and environmental aspects of integrated generation and utilization of energy in urbanized areas. Monograph]. *Dnipropetrovsk, NMU*, 220.
- [5] Kozaruk, A.E., Vasiliev, B.Yu. (2015). Metod i sredstva povyshenija jenergojeffektivnosti mashin i tehnologij s asinhronnym jelektroprivodom [Method and means of improving the energy efficiency of machines and technologies with asynchronous electric drive]. *Bulletin of SUSU. Ser. "Energy"*, 15, 1, 47-53. DOI: 10.14529/power150106. (in Russian).
- [6] Bepalov, V.Ja. (2014). Novaja vysokoeffektivnaja serija asinhronnyh dvigatelej 7AVE, ee modifikacii i specializirovannye ispolnenija [New high-performance series of 7AVE asynchronous motors, its modifications and specialized versions]. *Trudy VIII Mezunar. (HIH Vseros.) nauch.-tehn. konf. po avtomatizir. jelektroprivodu. – Saransk*, 239-243. Kobelev, A.S., Kruglikov, O.V., Makarov, L.N. (in Russian).
- [7] Babokin, G.I. (2005). Ocenka jekonomii jelektricheskoy jenerгии v nereguliruemom asinhronnom jelektro-privode putem pereklyuchenija obmotok statora [Estimation of electrical energy savings in unregulated asynchronous electric drive by switching the stator windings]. *GIAB*, 7. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-ekonomii-elektricheskoy-energii-v-nereguliruemom-asinhronnom-elektroprivode-putem-pereklyucheniya-obmotok-statora> (date of the application: 08.07.2019). (in Russian).
- [8] Braslavsky, AND I., Ishmatov, Z.Sh., Polyakov V.N. (2004). Jenergosberegajushhij asinhronnyj jelektroprivod [Energy saving asynchronous electric drive]. *Academy*, 256. (in Russian)
- [9] Vasilev, B. (2014). Structure and three-level inverter control algorithm electric power facilities transportation of hydrocarbons. *Electrotechnic and computer systems*, 15(91), 220-223.
- [10] Kozyaruk, A. (2013). Structure, composition, and control algorithms of high-efficiency electric drives of gas-compressor units. *Russian Electrical Engineering, February*, 84, Iss.2., 94-102. DOI: 10.3103/S1068371213020077. Vasilyev, B.Yu., Kozaruk, A.
- [11] Leznov, B.S. (2013). Chastotno-reguliruemyy jelektroprivod nasosnyh ustanovok [Variable Frequency Electric Pumping Units]. *Engineering*, 176. (in Russian)
- [12] Leznov, B.S. (2006). Jenergosberezhenie i reguliruemyy privod v nasosnyh i vozdushnyh ustanovkah [Energy saving and controlled drive in pump and air units]. *Energoatomizdat*, 256. (in Russian)
- [13] Dzenis, S.E., Shevchenko, V.V., Hanin, O.O. (2015). Vybor asinhronnogo dvigatelja privoda ventiljatora teplovoza s usloviem obespechenija ego ustojchivoj raboty [Selection of asynchronous motor of drive of diesel locomotive fan with the condition of ensuring its stable operation]. *Collection of scientific works of Kharkiv University of Air Forces*, 4(45), 92-96.
- [14] Kazachkovsky, N.N. (2018). Sopotavlenie zakonov chastotnogo upravlenija na primere preobrazovatelja chastoty Altivar 21 [Comparison of the laws of frequency control. Case study of the frequency converter Altivar 21]. *Girnichia elektromehanika that automation*, 100, 69-72.
- [15] Babokin, G.I. (2006). Ocenka jekonomii elektricheskoy jenerгии v sisteme reguljator napryazhenija asinhronnyj dvigatel' [Evaluation of energy saving in the system voltage regulator - asynchronous motor]. *GIAB. 1*. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-ekonomii-energeticheskoy-energii-v-sisteme-regulyator-napryazheniya-asinhronny-dvigatel-1> (date of the application: 08.07.2019). (in Russian)
- [16] Borodaj, V.A. (2019). Sposib sintezu reguljatora energoefektivnogo upravlinnja asinhronnim privodom mehanizmiv bez prjamoj stabilizacii shvidkosti [Method for synthesis of energy efficient control controller for asynchronous drive of mechanisms without direct speed stabilization]. *Electrical engineering and electric power*, 3, 16-23.
- [17] Gorbunov, R.L. (2014). Issledovanie trehfaznogo shirotno-impul'snogo preobrazovatelja peremennogo napryazhenija dlja povyshenija jenergojeffektivno-sti asinhronnyh dvigatelej [Study of a three-phase pulse-width converter of alternating voltage to increase the energy efficiency of induction motor]. *News of Tomsk Polytechnic Universit*, 324, 4, 76-86. (in Russian)
- [18] Borodaj, V.A. (2015). Shirotno-impul'snyj reguljator s koordinatno-fazovym upravleniem skvazhnosti. [Pulse-width regulator with coordinate-phase duty cycle control]. *Mining. Electromechanics and automation*, 95, 54-58.



## RESEARCH OF THE NON-SINUSOIDAL LOADS IMPACT ON THE OPERABILITY OF TAP-CHANGERS CONTACTS

ZINOVKIN V.V. Doctor of Technical Science, Professor, Professor of the department “Electric drive and automation of industrial installations” of the National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: super\_znvvv@ukr.net;

BLYZNIAKOV O.V. Candidate of Technical Science, associate professor, associate professor of the department “Electric and electronic apparatus” of the National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: blizn1953@gmail.com;

**Purpose.** To establish quantitative indicators of the influence of non-sinusoidal loads on the parameters and operability of contacts of voltage control devices of transformers of power-consuming electrical installations

**Methodology.** In our research, we used the probabilistic-statistical methods to analyze the experimental findings. Experimental studies were carried out applying advanced software-based methods for processing, systematizing and visualizing the findings derived.

**Findings.** The analysis of the accident rate of transformers for power-consuming technological installations showed that adjustable transformers, in particular, on-load tap-changers, are in many cases the cause of failure in the operation of electrical installations. On the example of a switching device of the RNOA-110/1250 type, it was experimentally established that the non-sinusoidality of the current caused by abruptly alternating loads, in combination with an increase in the number of switchings, leads to an increase in the contact resistance, which significantly reduces the reliability and serviceability of contacts.

**Originality.** The dependence of the transient resistance of the contacts of the voltage control device under the load of the transformer on the degree of non-sinusoidality of the load current is obtained.

**Practical value.** The results of the work can be used in the development of new designs of on-load tap-changers for special purpose operation under conditions of load fluctuations. In particular, the work is aimed to increase the reliability of on-load tap changers contact systems, as well as in the study of the operating conditions of network and furnace transformers in power supply systems of energy-intensive technological installations.

**Keywords:** transformer equipment; load fluctuations; on-load tap-changers; contacts; contact resistance; non-sinusoidal current; reliability.

### I. INTRODUCTION

Reliable functioning of power supply systems for energy-intensive technological electrical installations, such as arc steel-melting furnaces, rolling mills, transmission lines and back-to-back stations, rectifier and inverter substations, as well as facilities for converting the AC frequency 50 Hz to 60 Hz (Vyborg HVDC scheme), is an important technical problem [6]-[8], [10]-[12]. It is known that the key and most critical element of such systems are power (furnace) on-load tap-changing transform-

ers, the reliability of which is largely determined by the reliability of the on-load tap-changers (OLTC), in particular of their contact systems [2], [6]. This is due to the fact that the maintenance of the directive task of the technological process is achieved by permanent voltage regulation using tap-changing devices and is confirmed by the data on the damageability of transformer equipment in the power supply systems of energy-intensive industries, presented in Table 1.

**Table 1.** Emergency rate of transformer equipment by its components and voltage ratings

Component	Voltage ratings, kV											
	35		110		220		330		500		Aggregate	
	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%
Windings	61	30	43	13	10	7	1	8	0	0	115	16
On-load tap changers	4	2	61	18	26	19	1	8	5	24	97	13,5
Bushings	27	13	77	23	44	32	3	23	7	34	158	22
Other components and causes	81/31	40/15	126/31	37/9	55/1	41/1	8/0	61/0	9/0	42/0	279/0	39,5/9
Total	204	100	338	100	136	100	13	100	21	100	712	100

The data presented in Table 1 show that the accident rate of transformer equipment due to failures of OLTC is relatively low compared to other components. However, a more detailed analysis shows that defects in OLTC, which are often latent in behavior, are the cause of failures on bushings, windings, other components of transformer equipment and the system as a whole [6].

## II. ANALYSIS OF RECENT RESEARCHES

An essential feature of the OLTC operation is that, in the tap-changing process, they carry out multiple tap-changing operations under conditions of load fluctuations [2], [7], [10]–[12] and a significant incompliance of the power quality characteristics with standardized ones [16]. In the process, non-stationary electromagnetic processes and, accordingly, more severe operating conditions are initiated, which are usually not taken into account when developing OLTC contact systems [1], [2], [4], [5], [9]. In the given case we are dealing with higher harmonics and current unbalance, which, as it is well known, significantly affect the operability of the OLTC contacts, in particular, the contact resistance and switching wear resistance [4], [5], [13], [14]. Therefore, they are imposed by increased requirements.

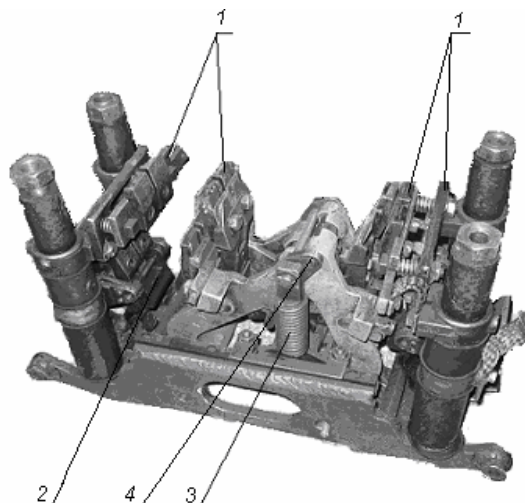
A significant number of publications are devoted to the study of the effect of load fluctuations on transformer equipment [7], [10]–[12], [15]. Such kind of research has also been carried out for OLTC [10]; however, they require further development due to the specific functioning of their contact systems. In particular, the influence of higher harmonics and unbalance in the current on the parameters of electrical contacts and their reliability has been insufficiently studied.

## III. FORMULATION OF THE WORK PURPOSE

The purpose of this work is to analyze the operating conditions, to determine the cause-and-effect factors that lead to a decrease in the reliability of OLTC contact systems. The main task of the study is, first and foremost, to determine quantitative characteristics of the influence of load fluctuations on the parameters of the OLTC contacts. The task of the research is also the use of the derived scientific findings for the purpose to modernize operable devices and to develop new engineering and technical solutions.

## IV. PRESENTATION OF THE BASIC MATERIAL AND ANALYSIS OF THE OBTAINED RESULTS

The object of the study was the contact system of the contactor of the switching device of the RNOA-110/1250 type, the appearance of which is shown in Fig. 1, and its electrical characteristics are given in Table 2.



**Figure 1.** Appearance of the PHOA-110/1250 type OLTC

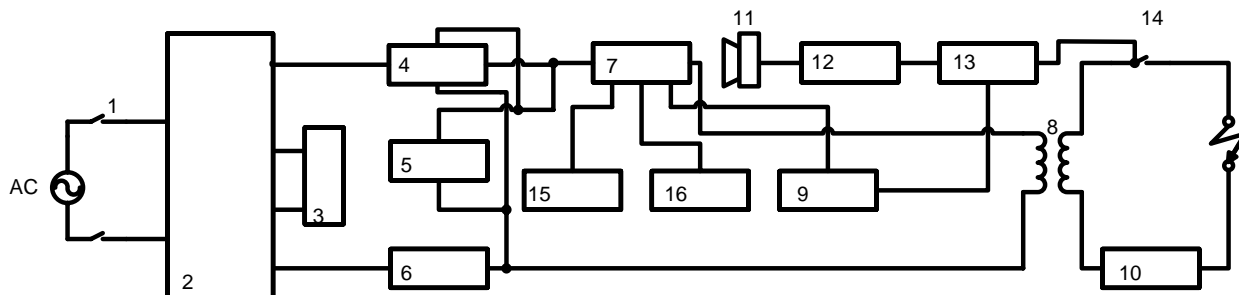
The following designations are accepted in Figure 1: 1 and 2 are arcing and main contacts, respectively; 3 and 4 are spring and hinge mechanisms, respectively.

To execute the experimental research, a specialized installation has been developed. Its structural diagram is shown in Figure 2.

The following designations are accepted in Figure 2: 1 – switch; 2 – non-sine waveform generator; 3 – current THD regulator; 4,5,6 – measuring transducers of power, voltage and current, respectively; 7 – test object (arcing contacts); 8 – transformer; 9 – electric drive of the OLTC; 10 – load; 11 – movie camera; 12 – movie camera drive; 13 – block for coordination of starting the all mechanisms drives; 14 – short-circuiter; 15 – chromel-copel thermocouples; 16 – thermal imaging camera.

**Table 2.** Technical parameters of the investigated switching device of the RNOA-110/1250 type

No.	Parameter name, measurement unit	Value
1	Rated voltage, kV	110
2	Rated current, A	1250
3	Mechanical life, thousand switching operations (not less)	500
4	Switching life of arcing contacts, thousand switching operations (not less)	50
5	Time of changing over operation from one fixed position to another one, seconds	3,8±20%
6	Number of switching operations before oil change in the contactor, thousand (not less)	50
7	Mass of the on-load tap changer without oil, kg	1300



**Figure 2.** Block diagram of a specialized device for experimental study of electrothermal processes in the contacts of switching devices.

The research were performed using a single-phase model of the on-load tap-changer contactor, which was connected to phase A of the physical model of an electric furnace transformer. Supply voltage was applied to the installation from an AC power source using a switch 1. The current THD was adjusted using a shaper 2 controlled by unit 3. The parameters to be researched were measured with devices 4, 5, 6, 15. A movie camera 11 made filming to visualize the contact opening process and further analysis. The contact heating temperature was measured using chromel-copel thermocouples 15 and thermal imaging camera 16. Unit 13 was used to coordinate the operation of short-circuiter 14, movie camera 11, thermocouples 15 and the transformer physical model 8. After each series of tap-changing operations, the contact resistance of the contacts being investigated was measured. The experimental research findings for six values of the THD current are shown in Table 3.

It is known that the contact resistance is a random variable [1], [4], [5], therefore, Table 3 presents the mathematical expectations of the contact conductance, derived from the probabilistic-statistical analysis of several parallel measurements [3]. The mathematical expectation of the contact conductance at certain values of the number of tap-changing operations is selected as the arithmetic mean of the results of parallel measurements:

$$\bar{\sigma} = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_i}{n}, \tag{1}$$

where  $i$  is the serial number of the measurement;  $n$  is the number of parallel measurements;  $\sigma_i$  is the contact conductance at the  $i$ -th measurement.

The sample values of the general variance and the root-mean-square error of a single measurement of the contact conductance were calculated using the following formula:

**Table 3.** Findings of the contact conductance measurements in relative units

Number of switching operations, $\cdot 10^4$	THD, %					
	4,0	6,3	9,5	13,5	22,0	31,7
0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
0,1	0,99	0,99	0,99	0,97	0,97	0,97
0,3	0,98	0,96	0,94	0,92	0,90	0,88
0,5	0,96	0,92	0,88	0,84	0,80	0,76
0,7	0,94	0,88	0,83	0,77	0,72	0,66
0,9	0,92	0,85	0,79	0,73	0,66	0,60
1,2	0,88	0,80	0,73	0,65	0,58	0,50
1,6	0,86	0,77	0,68	0,60	0,51	0,42
2,0	0,79	0,71	0,64	0,56	0,49	0,41
2,4	0,75	0,68	0,62	0,54	0,48	0,41
2,7	0,71	0,65	0,59	0,53	0,47	0,41
3,0	0,69	0,64	0,58	0,52	0,46	0,41

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\sigma_i - \bar{\sigma})^2}{n-1}; \quad s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\sigma_i - \bar{\sigma})^2}{n-1}} \tag{2}$$

The correlation function of the contact conductance, depending on the conditional numbers of the measurement series and the number of tap-changing operations, was determined in accordance with the following relationship:

$$K(l) = \frac{\sum_{l=2}^m (\sigma_{l-1} - \bar{\sigma}_{l-1})(\sigma_l - \bar{\sigma}_l)}{2 \cdot m + 1}, \tag{3}$$

where  $l$  is the serial number of the measurement

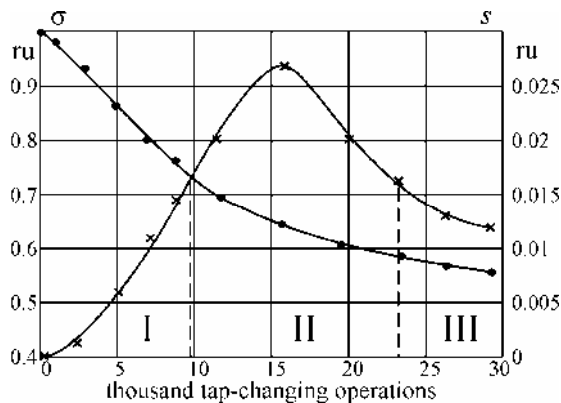
series corresponding to the number of tap-changing operations;  $m$  is the number of experiments in a series of studies.

The probability densities of the contact conductance values (in the form of discrete values of the probability of their falling into the given intervals) were determined according to the expression:

$$f_j(\sigma_i) = \frac{k_j}{k \cdot h}, \quad (4)$$

where  $k_j$  is the number of conductance values falling into the interval  $\sigma_{j-1} < \sigma_i \leq \sigma_j$ ;  $k$  is the total number of conductance values obtained in the experiments;  $h$  is the interval width  $h = \sigma_j - \sigma_{j-1}$ .

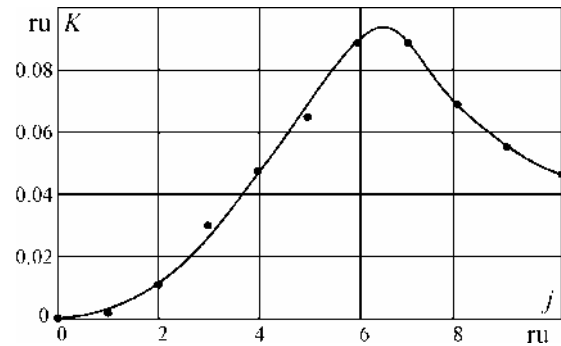
The mathematical expectation and variance of the contact conductance, calculated from experimental findings, depending on the number of tap-changing operations, are shown in Figure 3.



**Figure 3.** Experimental dependency the contact conductance vs the number of tap-changing operations: ● – mathematical expectation; × – variance

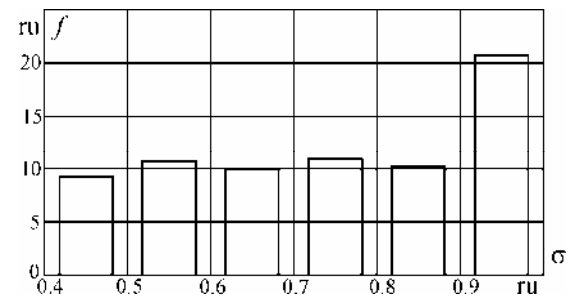
An analysis of the invariance indicates that the largest deviations in the contact conductance occur in the range of 10 to 24 thousand tap-changing operations (region II, Figure 3). This can be explained as follows. In the initial stage of testing (region I, Figure 3), the contacts surfaces wear in less degree due to erosion processes. As the number of tap-changing operations increases, the contact wear effect due to arc erosion increases significantly (region II, Figure 3). However, when a certain level of wear is reached, their influence begins to decrease (region III, Figure 3).

Figure 4 shows the graphical dependence of the correlation function depending on the serial number of the series of experiments. It is indication of the relationship between the conductance values in adjacent series of experiments at the corresponding values of the number of tap-changing operations (i.e. the influence of values in the previous series of experiments that characterize the degree of wear of the contact surfaces).



**Figure 4.** Correlation function of the contact conductance

Figure 5 shows the probability distribution density of the contact conductance, which in this case complies with a uniform law. The presented dependence makes it possible to estimate the number of conductance values that fall into the corresponding intervals.

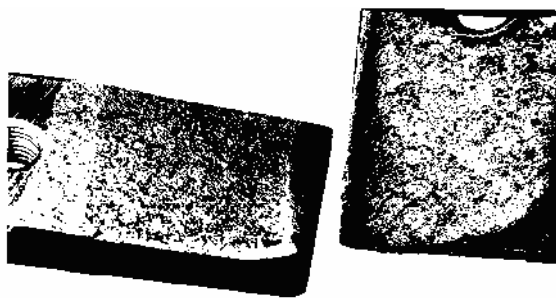


**Figure 5.** Density of the probability distribution of contact conductance

The analysis of the findings derived made it possible to establish certain regularities of decreasing the reliability of the OLTC in systems with load fluctuations in comparison with general-purpose systems. This can be explained by the fact that, due to electric arc erosion, the alloy structure of the metals used for making the contacts of the OLTC is partially destroyed. In the process, the contact resistance after each series of tap-changing operation increases resulted from a change in the state of the contact surfaces. Ultimately, the contact surfaces take a shape that is significantly different from the initial one.

From 40% to 80% of the contact surface is destroyed, depending on the duration of the arc discharge during the tap-changing process. Contacts are destroyed most intensively at small distances between them. A significant role plays the cumulative effect when the contact surfaces are repetitively exposed by an electric arc discharge. It is well-known that the shorter the arc during the switching process, the less wear and the higher the reliability of the contact system and the tap-changer as a whole [1], [2], [4], [5]. As an example, Figure 6 shows the contact surfaces exposed

by arcing after 10,000 tap-changing operations.



**Figure 6.** Photographs of the contact surfaces of the OLTC after experimental studies

The results of the studies of the contacts make it possible to formulate technical requirements and technical specifications for the design of new standard versions of OLTC for special purposes and the reconstruction of general-purpose developments.

#### IV. CONCLUSION

1. Based on the analysis of the accident rate of transformer equipment in the power supply systems of energy-intensive industrial enterprises, it was found that one of the possible root causes of the development of accidents is damage to switching devices. At the same time, they refer to hidden factors, since when investigating accidents, primary attention is paid to obvious consequences, such as failures bushings, systems for exciting a magnetic field, magnetic circuits, electrodynamic effects, etc.

2. Indicators of accident rates of transformer equipment due to OLTC failures in power supply systems of energy-intensive industries, especially at load fluctuations, are 52% higher compared to general-purpose systems. However, if the hidden behavior of the OLTC failures is taken into account, then the given indicator can increase significantly.

3. In the existing literary sources, there are practically no investigations of switching processes in OLTC for the purpose to determine the cause-and-effect factors of reducing their functional reliability in systems, where the power quality characteristics do not comply with the standard requirements.

4. A specialized device was proposed and a technique was developed for the experimental study of switching processes in tap-changers at variable THD of the exciting current, which made it possible to obtain specific results that explain the cause-and-effect factors of contact damage.

5. The contact resistance directly increases with the increase in the number of tap-changing operations, as well as the THD of the exciting current. It is shown that the largest dispersion in the contact resistance occurs in the range from 10 to 24 thousand tap-changing operations.

#### REFERENCE

- [1] Aleksandrov, G.N., Borisov, V.V., Kaplan, G.S., i dr. (2000). Teoriya elektricheskikh apparatov: Uchebnik dlya vuzov / pod red. prof. G.N. Aleksandrova. SPb. Izd-vo SPbGTU, 540.
- [2] Porudominskiy, V.V. (1974). Ustroystva pereklyucheniya transformatorov pod nagruzkoy M. Energiya. 288.
- [3] Vilenkin, S.Ya. (1979). Statisticheskaya obrabotka rezul'tatov issledovaniya sluchaynykh funktsiy. M. Energiya. 250.
- [4] Slade, P.G. (2014). Electrical Contacts: Principles and Applications. CRC Press Taylor & Francis Group, LLC. 1257.
- [5] Braunovich, M., Konchits, V.V., Myshkin, N.K. (2007). Electrical Contacts: Principles, Applications and Technology. CRC Press Taylor & Francis Group, LLC, 660.
- [6] Vanin, B.V. (2001). O povrezhdeniyakh silovykh transformatorov napryazheniyem 110–500 kV v ekspluatatsii [About failures of 110–500 kV power transformers in operation]. *Electric stations*, 9, 53–58, (in Russian).
- [7] Zinovkin, V.V., Sisunenkov, O.I., Sergiyenko, S.L., Zozulya, D.V. (1994). Nestatsionarnyye rezhimy silovykh transformatorov pri rezkoperemennoy nagruzke [Unsteady state conditions of power transformers under load fluctuation]. *Energy and Electrification*, 5, 48–52, (in Russian).
- [8] Vlasov A.B. (2002). Raschet ekspluatatsionnykh pokazateley nadezhnosti kontaknykh soyedineniy s pomoshch'yu teplovizionnogo kontrolya [Calculation of reliability operational performances of contact connections using thermal imaging control]. *Electrical Engineering*, 8, 30–35, (in Russian).
- [9] Plokhov, I.V. (2004). Issledovaniye soprotivleniya styagivaniya elektricheskogo kontakta [Study of the constriction resistance of electrical contact]. *Electrical Engineering*, 5, 13–18 (in Russian).
- [10] Zinovkin, V., Kusch, V. (2012). Electromagnetic processes modelling in the electric equipment of the abruptly variable loads systems *United States: The Advanced Science*, 1, 138–140.
- [11] Zinovkin, V., Blyzniakov, O., Vasilieva, E. (2017). Physical Simulation of Electromagnetic Phenomena in Transformer Equipment under Strongly Varying Loads. *IEEE: International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), November 15th–17th, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University, Ukraine*, 312–315.
- [12] Zinovkin, V., Blyzniakov, O., Vasilieva, E. (2019). Non-stationary electromagnetic processes in power-intensive electrical facilities with highly varying loads. *IEEE: International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), September 23th–25th, Kremenchuk Mykhailo*

*Ostrohradskyi National University, Ukraine, 362–365.*

[13] Kotsur, M.I., Yarymbash, D. S., Bezverkhnya, Yu.S., Kotsur, I.M. (2019). New approach for voltage drop estimation in the busbars of workshop networks at higher current harmonics influence. *Problemele energeticii regionale*, 1, 39, 43–56.

[14] Kotsur, M.I., Yarymbash, D.S., Bezverkhnia, Yu.S., Andrienko, A.A., Andrienko, D.S. (2018). Features of influence of the higher harmonics on choice parameters busbars of workshop networks. *Works of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 2 50,

51–56.

[15] Zinovkin, V.V., Blyzniakov, O.V. (2018). Determination of Equivalent Quantities of Electromagnetic Field in Massive Ferrous Details of Electric Equipment under Strongly Varying Loads. *Electrical Engineering and Power Engineering*, 4, 8–16.

[16] EN 50160, (1999). Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems.

The article was received 05.06.2020

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ НЕСИНУСОЇДАЛЬНИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА РОБОТОСПРОМОЖНІСТЬ КОНТАКТІВ ПРИСТРОЇВ РПН

ЗИНОВКІН В.В.

*д-р техн. наук, професор, професор кафедри «Електропривод та автоматизація промислових установок» національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, super\_znvvv@ukr.net;*

БЛИЗНЯКОВ О.В.

*канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри «Електричні та електронні апарати» національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, blizn1953@gmail.com;*

**Мета роботи.** Встановити кількісні показники впливу несинусоїдальних навантажень на параметри і роботоспроможність контактів пристроїв регулювання напруги трансформаторів під навантаженням (пристроїв РПН) для енергоємних технологічних установок.

**Методи дослідження.** У роботі використані методи імовірно-статистичного аналізу результатів експериментальних досліджень. Експериментальні дослідження виконані з використанням сучасних програмних методів обробки, систематизації та візуалізації отриманих результатів.

**Отримані результати.** Аналіз аварійності трансформаторів для енергоємних технологічних установок показав, що пристрої РПН є в багатьох випадках причиною збою в роботі технологічних установок. На прикладі пристрою РПН типу РНОА-110/1250 експериментально встановлено, що несинусоїдальність струму, що є наслідком різкозмінного навантаження, у поєднанні зі зростанням кількості перемикачів призводить до збільшення перехідного опору контактів, що істотно знижує показники надійності і роботоспроможності контактів.

**Наукова новизна.** За даними експерименту і їх статистичної обробки отримана залежність перехідного опору контактів пристрою РПН від коефіцієнта несинусоїдальності струму навантаження при різних кількостях перемикачів під навантаженням.

**Практична цінність.** Результати роботи можуть використовуватись при розробці нових типів пристроїв РПН спеціального призначення для роботи при різкозмінних навантаженнях, зокрема, підвищення надійності їх контактних систем, а також при дослідженні можливих режимів надійної роботи мережевих і пічних трансформаторів в системах електропостачання енергоємних технологічних комплексів.

**Ключові слова:** трансформаторне обладнання; різкозмінні навантаження; пристрої РПН; контактний опір; несинусоїдальний струм; надійність.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕСИНУСОИДАЛЬНЫХ НАГРУЗОК НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ КОНТАКТОВ УСТРОЙСТВ РПН

ЗИНОВКИН В.В.

*д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» национального университета «Запорожская политехника», Запорожье, Украина, super\_znvvv@ukr.net;*

БЛИЗНЯКОВ А.В.

*канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Электрические и электронные*

аппараты» национального университета «Запорожская политехника», Запорожье, Украина, e-mail: blizn1953@gmail.com;

**Цель работы.** Установить количественные показатели влияния несинусоидальных нагрузок на параметры и работоспособность контактов устройств регулирования напряжения трансформаторов под нагрузкой (устройств РПН) для энергоемких технологических установок.

**Методы исследования.** В работе использованы методы вероятностно-статистического анализа результатов экспериментальных исследований. Экспериментальные исследования выполнены с использованием современных программных методов обработки, систематизации и визуализации полученных результатов.

**Полученные результаты.** Анализ аварийности трансформаторов для энергоемких технологических установок показал, что устройства РПН являются во многих случаях причиной сбоя в работе технологических установок. На примере устройства РПН типа РНОА-110/1250 экспериментально установлено, что несинусоидальность тока, вызываемая резкопеременными нагрузками, в сочетании с ростом количества переключений приводит к увеличению переходного сопротивления контактов, что существенно снижает показатели надежности и работоспособности контактов.

**Научна новизна.** По данным эксперимента и их статистической обработки получена зависимость переходного сопротивления контактов устройства РПН от коэффициента несинусоидальности тока нагрузки при различных количествах переключений под нагрузкой.

**Практическая ценность.** Результаты работы могут использоваться при разработке новых типов устройств РПН специального назначения для работы при резкопеременных нагрузках, в частности, повышения надежности их контактных систем, а также при исследовании возможных режимов надежной работы сетевых и печных трансформаторов в системах электроснабжения энергоемких технологических комплексов.

**Ключевые слова:** трансформаторное оборудование; резкопеременные нагрузки; устройства РПН; контактное сопротивление; несинусоидальный ток; надежность.

УДК 621.316.13

## МЕТОД РАСЧЕТА УСТАНОВИВШИХСЯ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

ПАТАЛАХ Д.Г. Аспирант Национального университета «Запорізька політехніка», Запорожье, Украина, e-mail: patalakh.dmytro@gmail.com

ТИХОВОД С. М. д.т.н., доц. Национального университета «Запорізька політехніка», Запорожье, Украина, e-mail: stikhovod@gmail.com.

**Цель работы.** Разработка метода расчета установившихся периодических процессов сложной формы.

**Методы исследования.** Использована полиномиальная аппроксимация функций, численные методы решения интегро-дифференциальных уравнений, математический аппарат матричной алгебры, компьютерное программирование и методы теории электрических цепей.

**Полученные результаты.** В результате модификации известного метода расчета переходных процессов разработан метод, который позволяет непосредственно выполнять расчет установившихся периодических процессов. Это сокращает время компьютерного моделирования установившихся периодических электрических процессов в линейных электрических цепях. Показан пример применения предложенного метода. На основании разработанного метода составлена компьютерная программа для расчета установившегося процесса в модельной цепи. Данный пример показал сокращение процессорного времени на 45% по сравнению с применением известных методов.

**Научная новизна.** Процессы в электрических цепях описываются интегро-дифференциальными уравнениями. При их решении использована аппроксимация функций производных токов от времени рядами по ортогональным полиномам Чебышева. При аппроксимации функций полиномами Чебышева имеет место свойство равномерности погрешности во всем диапазоне изменения аргумента. Это выгодно выделяет их из ряда других ортогональных функций. В предложенном методе использована полиномиальная аппроксимация не самой функции решения, а ее производной. Сама функция находится операцией интегрирования. Эта операция имеет малую погрешность по сравнению с операцией дифференцирования. Непосредственный расчет установившегося периодического процесса достигается тем, что начальные условия для токов и их производных в начале периода берутся как значения этих же функций в конце периода. В предложенном методе интегро-дифференциальные уравнения состояния преобразуются в линейные алгебраические уравнения. Предложена методика составления единой системы линейных алгебраических уравнений. Решение этой системы позволяет непосредственно выполнять расчет установившихся периодических процессов.

**Практическая ценность.** Разработанный метод открывает новую возможность использования многообразного аппарата теории электрических цепей для работы с изображениями токов. На основании этого метода разрабатывается универсальный программный комплекс для расчета установившихся периодических процессов в электрических цепях произвольной сложности. Это позволит сократить процессорное время моделирования сложных цепей.

**Ключевые слова:** установившийся процесс; численные методы; схемная модель; полиномиальная аппроксимация; полиномы Чебышева

### I. ВВЕДЕНИЕ

В конструкторской практике возникает потребность расчета установившихся периодических процессов. Известно [1], что установившийся процесс – это часть переходного процесса, рассматриваемая при полном затухании свободной составляющей. Теоретически полное затухание переходного процесса наступает при текущем времени  $t \rightarrow \infty$  (практически  $t > 3\tau$  постоянных времени переходного процесса). Исходя из этого, установившийся процесс может быть получен численным методом [2], [3] путем расчета переходного процесса до его полного затухания. Переходные процессы в электротехнических устройствах могут быть длительными. При медленно затухающих

переходных процессах этот способ требует значительного времени расчета, что может привести к большой накапливаемой ошибке.

### II. АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

В литературе широко известен метод расчета установившихся несинусоидальных процессов в электрических цепях, основанный на разложении несинусоидальных функций ЭДС в тригонометрический ряд Фурье. Расчет выполняется последовательно для всех гармоник ЭДС комплексным (символическим) методом и, затем, используется принцип наложения [1] для получения результирующих кривых. В этом случае несинусоидальные токи и напряжения выражаются суммами тригонометрических рядов [4]. Метод



требует использования значительного числа гармоник, что не гарантирует от значительной погрешности расчета.

Расчету установившегося периодического режима в автономных [5] и неавтономных системах, минуя переходный процесс, посвящено значительное число работ, например, [6], [7].

В системах, когда период колебаний определяется периодом ЭДС источников, решение для установившегося режима может быть получено просто.

В работе [8] период моделирования разбивался на  $N$  участков. Каждый участок рассматривался как шаг интегрирования какого-то численного метода расчета дифференциальных уравнений. Уравнения состояния записывались для каждого шага. На каждом шаге начальные условия использовались как результаты расчета на предыдущем шаге. На первом шаге начальные условия использовались как результаты расчета на последнем шаге. Метод отличается простотой, но требует значительной оперативной памяти компьютера даже для не очень сложных цепей.

В работе [9] решение представлено в виде разложения в ряд по алгебраическим полиномам. Период  $T$  разбивается на  $n$  равных шагов и для каждой точки разбиения составляется уравнение состояния цепи. В результате получается система алгебраических уравнений, для которой записывается условие периодичности. Условие периодичности заключается в том, что начальные условия приравниваются к условиям в конце периода. Решение системы дает коэффициенты полинома, по которым определяется ток в любой момент времени в течение периода. Данный метод использован для одного уравнения состояния одноконтурной цепи, но может быть развит для сложных цепей.

В работе [10] показано развитие и модификация численного метода В.Ю. Ломоносова, использующего аппроксимацию решения алгебраическими полиномами, для расчета установившихся периодических несинусоидальных токов и напряжений в электрических цепях. Производную решения предложено аппроксимировать полиномом  $p(t)$  ( $N-1$ -ой степени). Интервал изменения аргумента разбивается на  $N-1$  отрезков точками  $t_1, t_2, \dots, t_N$ . Для аппроксимирующего полинома задается дополнительное условие такое, чтобы в точках  $t_k$  деления интервала изменения аргумента выполнялось равенство:

$$i'(t_k) = p(t_k),$$

где  $k = 1, 2, \dots, N$  – номера опорных точек.

В результате этого получается система из  $3N$  уравнений с количеством неизвестных, равным  $3N$ . При увеличении  $N$  до 45 погрешность расчета уменьшается, однако при  $N > 45$  погрешность начинает возрастать. Это связано с потерей точности аппроксимации решения полиномами высокого порядка. Установлено, что если ЭДС источника содержит гармоники выше третьей, то приемлемой погрешности нельзя

добиться ни при каких значениях  $N$ . Таким образом, востребованными практикой является разработка усовершенствованного компьютерного метода расчета установившихся периодических процессов сложной формы.

### III. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является модификация разработанного метода расчета переходных процессов в электрических цепях [11] таким образом, чтобы сразу непосредственно выполнялся расчет установившихся процессов. При этом необходимо сократить процессорное время расчета и повысить точность расчета.

### IV. ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для простоты изложения, также как и в работе [11], рассмотрим сначала одноконтурную электрическую цепь, содержащую включенные последовательно элементы: резистивный ( $R$ ), индуктивный ( $L$ ) и емкостный ( $C$ ) (рис. 1).

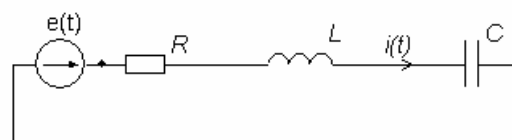


Рисунок 1. Моделируемая электрическая цепь

Интегро-дифференциальное уравнение состояния цепи  $R-L-C-e$  имеет вид [1]:

$$L \frac{di}{dt} + Ri + \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i(t) dt + u_C(t_0) = e(t). \quad (1)$$

Функцию для производной тока по времени аппроксимируем полиномом  $p(x)$   $N-1$ -ой степени [12], [13]:

$$\frac{di(x)}{dt} = i'(x) \approx p(x) = c_0 T_0(x) + c_1 T_1(x) + c_2 T_2(x) + \dots + c_{N-1} T_{N-1}(x) \quad (2)$$

Временной интервал моделирования  $[a, b]$  выберем равным периоду ЭДС источника. Выберем в интервале моделирования  $t \in [a, b]$  ряд  $N$  узловых точек. Положим, что для всех  $N$  узловых точек со значением аргумента  $t_m(x_m)$  соответствуют следующие значения функции [11]

$$i'(x_m) = p(x_m),$$

$$m = 0, 1, 2, \dots, N-1.$$

Вычисление матриц  $\mathbf{V}$ ,  $\mathbf{D}$ ,  $\mathbf{W}$  выполняется с помощью подпрограммы VDW по формулам [11] ф. (25,10,44). Эти матрицы фигурируют в уравнении второго закона Кирхгофа для изображений токов в цепи замещения:

$$\begin{aligned} (L \cdot D + R \cdot V + B \cdot W) \cdot C = \\ = e - R \cdot A \cdot I_0' - R \cdot I_0 - L \cdot I_0' - BQ - u_{c0} \end{aligned} \quad (3)$$

В цепи замещения протекает не истинный ток, а проходит его изображение **C**. Изображение **C** – это вектор коэффициентов разложения тока  $i(t)$  по полиномам Чебышева. Вектор **I** значений тока  $i(t)$  в узловых точках определяется уравнением [11] ф. (25):

$$\begin{aligned} I = (S - S_0 - A \cdot T_{x0}) \cdot C + \Delta \cdot I_0' + I_0 = \\ = V \cdot C + \Delta \cdot I_0' + I_0 \end{aligned} \quad (4)$$

Этот вектор задает значения тока  $i(t)$  в заданных узловых точках в течение переходного процесса. Для его однозначного определения необходимо иметь значения тока и его производной в начальной точке. В уравнении (4) начальные значения – это векторы  $I_0$  и  $I_0'$ . Вектор  $I_0$  содержит все элементы, имеющие одинаковые значения, равные  $i(t_0)$ . Вектор  $I_0'$  содержит все элементы, имеющие одинаковые значения, равные  $i'(t_0)$ .

Чтобы уравнение (3) описывало не переходный процесс в электрической цепи, а установившийся процесс, необходимо, чтобы начальные значения тока и его производной были равны значениям тока и его производной в конце периода.

В уравнении (3) также фигурируют значения векторов **Q**,  $I_0$ ,  $I_0'$  и значение  $u_{c0}$ , которые вычисляются при использовании значений  $i(t_0)$ ,  $i'(t_0)$ ,  $u_{c0}$ . Эти значения необходимо получить исходя из значений соответствующих функций в конце периода.

В работе [11] расчет переходного процесса по предложенному методу заключается в выполнении пунктов:

- Определение чебышевских узлов интерполяции на  $x \in [-1, 1]$ :

$$x_k = -\cos\left[\frac{2k+1}{2N}\pi\right], \quad k=0, 1, \dots, N-1.$$

- Формирование матриц **V**, **D**, **W**.
- Вычисление функций:

$$J_4(x) = i_0' \cdot (x^2/2 + x_0 \cdot x);$$

$$J_5(x) = i_0 \cdot x$$

для чего используются начальные значения тока  $i_0$  и производной тока  $i_0'$ .

- Вычисление функции

$$q(x) = J_4(x) + J_5(x),$$

которая используется для формирования матрицы **Q**.

Чтобы уравнение (3) описывало установившийся процесс, необходимо, чтобы начальные значения тока и его производной были равны этим же значениям в конце периода. При этом векторы **C**, **I**, **I'**,  $U_c$  должны

вычисляться одним математическим действием. Этим же действием необходимо вычислять значения векторов:  $I_0$ ,  $I_0'$ ,  $U_{c0}$ . В этих векторах все значения равны значениям последних элементов векторов **I**, **I'**,  $U_c$ .

Покажем, как это выполнить одним действием.

Пусть дана матрица-столбец, содержащая всего три значения:

$$I = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Требуется получить матрицу-столбец  $I_0$ , все элементы которой были бы равны **I**(3). Это можно выполнить решением следующего уравнения:

$$M \cdot X = F, \quad (6)$$

где

$$X = \begin{bmatrix} I \\ I_0 \\ i_0 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$M = \begin{bmatrix} E & \text{Nul} & s_0 \\ \text{Nul} & E & -E_2 \\ N_1 & N_0 & -1 \end{bmatrix}; \quad (8)$$

$$F = \begin{bmatrix} I \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad (9)$$

$$E = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (10)$$

$$\text{Nul} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad (11)$$

$$N_0 = [0 \ 0 \ 0]; \quad (12)$$

$$N_1 = [0 \ 0 \ 1]; \quad (13)$$

$$E_2 = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}; \quad (14)$$

$$s_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (15)$$

Решение уравнения

$$X = M^{-1} \cdot F \quad (16)$$

дає вектор  $X$  розміра  $(7 \times 1)$ . Перші три значення вектора  $X$  містять значення вектора  $I$ . Наступні три значення вектора  $X$  містять значення  $I(3)$ : то єсть:

$$I_0 = X(4:6).$$

Цей прийом використовуємо для формування єдиної системи рівнянь для розв'язання задачі (1). Цю систему можна свести в матричну форму.

Систему складемо з наступних рівнянь.

Рівняння (3) після переносу всіх слагаємих в ліву частину має вигляд:

$$Z \cdot C - U + R \cdot A \cdot I_0' + R \cdot I_0 + L \cdot I_0' + BQ + u_{c0} = 0, (17)$$

$$Z = L \cdot D + R \cdot V + B \cdot W. (18)$$

Рівняння (4) після переносу всіх слагаємих в ліву частину:

$$V \cdot C - I + A \cdot I_0' + I_0 = 0. (19)$$

Рівняння [11] ф. (44) після переносу всіх слагаємих в ліву частину має вигляд:

$$B[W C + Q] - U_C + u_{c0} = 0. (20)$$

Використовуючи [11] ф. (40) запишемо:

$$q(x) = J_4(x) + J_5(x) = i_0' \cdot (x^2 / 2 + x_0 \cdot x) + i_0 \cdot x. (21)$$

В рівнянні (17) фігурує матрична змінна, яка має вигляд:

$$Q = I_0' \cdot ((x^2 / 2 + x_0 \cdot x) - (x_0^2 / 2 + x_0 \cdot x_0)) + A \cdot I_0,$$

або

$$Q = I_0' \cdot A_2 + A \cdot I_0, (22)$$

де

$$A_2 = (x_2 - x_{20}). (23)$$

З урахуванням прийнятих позначень рівняння (17) прийме вигляд:

$$Z \cdot C - U + Z_0 \cdot I_0' + (B \cdot A + R) \cdot I_0 + U_{c0} = 0, (24)$$

де

$$Z_0 = R \cdot A + L + B \cdot A_2. (25)$$

З урахуванням прийнятих позначень рівняння (20) прийме вигляд:

$$BWC + BAI_0 + BA_2I_0' - U_C + U_{c0} = 0. (26)$$

Позначимо  $X$  – вектор, що складається з восьми підвекторів, що мають розмір  $(N-1) \times 1$ , і підвектора розміру  $(3 \times 1)$ , що містить три скалярні значення:

$$X = [C \ I \ I' \ U_C \ I_0 \ I_0' \ U_{c0} \ U \ i_0 \ i_0' \ u_{c0}]^T, (27)$$

$$C = \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ \vdots \\ C_{N-1} \end{bmatrix}; (28)$$

$I, I'$  – вектори значень струму та його похідної в вузлових точках в рівняннях (17, 19).

$$U_C = \begin{bmatrix} uc_1 \\ uc_2 \\ \vdots \\ uc_{N-1} \end{bmatrix}; (29)$$

$$I_0 = \begin{bmatrix} i_0 \\ i_0 \\ \vdots \\ i_0 \end{bmatrix}; (30)$$

$$I_0' = \begin{bmatrix} i_0' \\ i_0' \\ \vdots \\ i_0' \end{bmatrix}; (31)$$

$$U_{c0} = \begin{bmatrix} uc_0 \\ uc_0 \\ \vdots \\ uc_0 \end{bmatrix}. (32)$$

Вектор  $U$  містить значення напруги всіх гілок в вузлових точках:

$$U = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_{N-1} \end{bmatrix}. (33)$$

Рівняння (24), (19), (26), (2.38-2.40) складають перші чотири рядки матриці  $M_0$ . Останні три рядки мають допоміжний характер, як в матриці (7). Останні три скалярні елементи вектора  $X$  також мають допоміжний характер, як в матриці (7).

$$X = [C \ I \ I' \ U_C \ I_0 \ I_0' \ U_{c0} \ U \ i_0 \ i_0' \ u_{c0}]$$

$$M_0 = \begin{bmatrix} Z & 0 & 0 & 0 & B \cdot d + R & Z_0 & E & -E & s_0 & s_0 & s_0 \\ V & -E & 0 & 0 & E & A & 0 & 0 & s_0 & s_0 & s_0 \\ B \cdot W & 0 & 0 & -E & B \cdot A & B \cdot A_2 & E & 0 & s_0 & s_0 & s_0 \\ D & 0 & -E & 0 & 0 & E & 0 & 0 & s_0 & s_0 & s_0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & E & 0 & 0 & 0 & -E_2 & s_0 & s_0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & E & 0 & 0 & s_0 & -E_2 & s_0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & E & 0 & s_0 & s_0 & -E_2 \end{bmatrix} (34)$$

(Жирними нулями позначено нульові матриці розміру  $(N-1) \times (N-1)$ ).

Приєднаємо до матриці (34) допоміжну матрицю (35).

$$s = \begin{bmatrix} N_0 & N_1 & N_0 & N_0 & N_0 & N_0 & N_0 & N_0 & N_0 & N_0 & N_0 \\ N_0 & N_0 & N_1 & N_0 & N_0 & N_0 & N_0 & N_0 & N_0 & N_0 & N_0 \\ N_0 & N_0 & N_0 & N_1 & N_0 & N_0 & N_0 & N_0 & N_0 & N_0 & N_0 \end{bmatrix} \quad (35)$$

В результате получим матрицу:

$$M_1 = \begin{bmatrix} M_0 \\ -S \end{bmatrix}. \quad (36)$$

Матрица  $M_1$  имеет размер  $(N-1)*7+3$ , а вектор  $X$  имеет размер  $(N-1)*8+3$ .

Чтобы уравнение  $M \cdot X = F$  имело единственное решение, к матрице  $M_1$  необходимо присоединить подматрицу:

$$U = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ E \ s_0 \ s_0 \ s_0]. \quad (37)$$

В результате получим матрицу:

$$M = \begin{bmatrix} M_0 \\ -S \\ U \end{bmatrix}. \quad (38)$$

Подматрица  $U$  соответствует уравнению

$$U = e, \quad (39)$$

где  $e$  – вектор значений ЭДС источника в узловых точках.

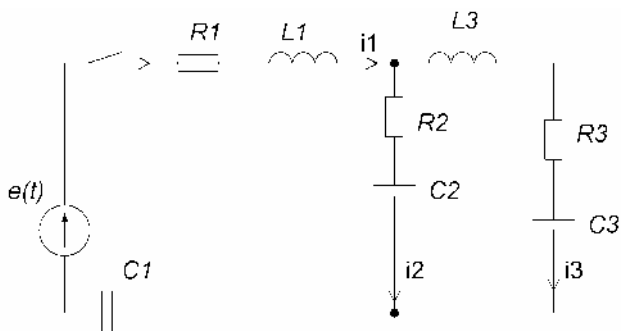
В результате уравнение

$$M \cdot X = F$$

имеет единственное решение – вектор  $X$  (4.21).

Вектор  $X$  содержит подвекторы размера  $(N-1)*1$  значений коэффициентов полинома  $S$ , значений тока и его производной в узловых **точках**  $I, I'$ , значений напряжения на конденсаторе в узловых точках  $U_c$ .

*Пример расчета* установившегося процесса в сложной электрической цепи на основе разработанного метода. Пусть задана электрическая цепь (рис.2).



**Рисунок 2.** Моделируемая двухконтурная электрическая цепь

Порядок расчета можно формализовать следующей последовательностью действий:

1. Задание исходных данных. ∈ Значения элемен-

тов каждой ветви:

$$L1=0.01; R1=1; C1=0.0001; L2=0.001; R2=2; C2=0.0002; L3=0.006; R3=3; C3=0.0003,$$

значение периода  $T = 0.02$ , функция ЭДС источника на одном периоде, состоящая из двух гармоник:

$$e(t) = E_m \sin(2\pi f + \varphi_1) + E_m \sin(2\pi f \cdot 5 + \varphi_5),$$

где  $E_m = 100; f = 50; \varphi_1 = 0; \varphi_5 = 0$ ,

количество узловых точек  $N = 120$ .

2. Определение чебышевских узлов интерполяции на  $x \in [-1, 1]$ .
3. Вычисление матриц  $V, D, W$  с помощью подпрограммы VDW [11].
4. Вычисление значений ЭДС источника в узловых точках - вектор  $e$ .
5. На основе подпрограммы MatrM формирование матриц  $M_1, M_2 \dots M_b$  для каждой ветви  $1 \dots b$ .
6. Формирование матрицы  $M$ .
7. Запись в матричной форме уравнений второго закона Кирхгофа. В цепи имеется два независимых контура. Согласно (37) напряжение одной ветви равно:

$$U = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ E \ s_0 \ s_0 \ s_0].$$

Сумма напряжений 1 и 2-й ветвей равна:

$$U_{12} = [U, U, M_R];$$

Сумма напряжений 2-й и 3-й ветвей равна:

$$U_{23} = [M_R, -U, U],$$

где  $M_R = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ s_0 \ s_0 \ s_0]$  – рабочая матрица.

8. Запись уравнений первого закона Кирхгофа. Значения в узловых точках тока одной ветви, а также его производная определяются подматрицей:

$$M_C = [E \ E \ E \ E \ E \ E \ 0 \ s_0 \ s_0 \ s_0];$$

В цепи имеется два узла. Независимый только один узел. Для него уравнение имеет вид:

$$C_1 = [-M_C, M_C, M_C].$$

9. Присоединение матриц, полученных на основании законов Кирхгофа, к матрице  $M$ :

$$M = \begin{bmatrix} M_{123} \\ U_{12} \\ U_{23} \\ C_1 \end{bmatrix}$$

10. Формирование вектора правых частей  $F$ .

Правые части уравнений, соответствующих матрице  $M$  имеют нулевые значения; следующие  $N-1$  значений – это вектор  $e$ , то есть сумма напряжений первой и второй ветвей равна ЭДС.; следующие  $N-1$  значений - нулевые, то есть сумма напряжений второй и третьей ветвей равна нулю. Согласно первому закону Кирхгофа, алгебраическая сумма токов в узле равна нулю. Таким образом, следующие  $N-1$  значений –

нулевые.

11. Решение уравнения

$$\mathbf{X} = \mathbf{M}^{-1} \cdot \mathbf{F}.$$

12. Построение графиков  $i_1(t)$ ,  $i_2(t)$ ...

Вектор значений тока  $i_1$  в узловых точках определяется как:

$$\mathbf{I}_1 = \mathbf{X}(N:2*N-2).$$

На основании изложенного порядка действий разработана компьютерная программа в системе GNU Octave [14], совместимой с системой Matlab [15]. Матрица  $\mathbf{M}$  имеет значительные размеры, но она является разреженной. В системе Matlab есть аппарат работы с разреженными матрицами - sparse [16]. Использование этого аппарата снимает проблему использования больших матриц.

Зависимость тока  $i_1(t)$  приведена на рис. 3. Расчет установившегося процесса точным комплексным методом, согласно условиям этой задачи, дает кривую, которая имеет хорошее совпадение с кривой, показанной на рис. 3. Это значит, что в точках локальных экстремумов погрешность расчета предложенным методом составляет меньше одного процента.

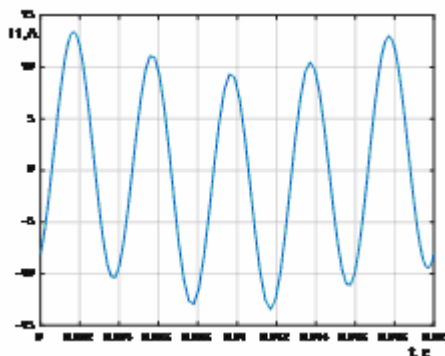


Рисунок 3. Зависимость тока  $i_1(t)$

## V. ВЫВОДЫ

Разработанный метод позволяет выполнять расчет установившегося периодического электрического процесса сложной формы, минуя переходный процесс. При этом сокращается процессорное время расчета и повышается его точность по сравнению с использованием известных методов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники. Т2 / К.С. Демирчян, Л.Р. Нейман, Н.В. Коровкин, В.Л. Чечурин. – Питер, 2003. – 567 с.  
[2] Ортега Дж. Введение в численные методы решения дифференциальных уравнений / Дж. Ортега, У. Пулл. – М.: Наука, 1986. – 288 с.

[3] Сегада М.С. Математичне моделювання в електроенергетиці / М.С. Сегада. – Львів: «Львівська політехніка», 2002. – 300 с.  
[4] Зигмунд А. Тригонометрические ряды. Т 2. / А. Зигмунд. – М.: Мир. – 1965. – 538 с.  
[5] Aprille T.J. Steady state analysis of nonlinear circuits with periodic inputs / T.J. Aprille, T.N. Trick // IEEE Trans. Circuit Theory. – 1972. – Vol. 60, №1. – P. 108-114.  
[6] Маляр В.С. Розрахунок усталених режимів у нелінійних електричних колах з реактивними елементами і несинусоїдними джерелами живлення / В. С. Маляр, І. А. Добушовська // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Електроенергетичні та електромеханічні системи. – 2011. – № 707. — С. 82-86.  
[7] Маляр В.С. Розрахунок статичних характеристик періодичних процесів диференціальним сплайн-методом / В.С. Маляр // Теоретична електротехніка. – 2000. – №55. – С. 37-42.  
[8] Тиховод С.М. Метод расчета установившихся и переходных процессов в сложных нелинейных цепях / С.М. Тиховод // Электротехника и электроэнергетика. – 2001. – № 2. – С. 5-9.  
[9] Тиховод С.М. Совершенствование методики расчета установившихся процессов в электрических цепях переменного тока / С.М. Тиховод // Электротехника та електроенергетика. – 2007. – № 2. – С. 29-33.  
[10] Ломоносов В.Ю. Периодические процессы в нелинейных цепях / В.Ю. Ломоносов // Электричество. – 1952. – №7. – С. 55-58.  
[11] Паталах Д.Г. Модификация метода численного расчета переходных процессов в электрических цепях на основе полиномов Чебышева / Д.Г. Паталах // Электротехника та електроенергетика. – 2019. – № 4. – С. 11-24.  
[12] Васильев Н.И. Применение полиномов Чебышева в численном анализе / Н.И. Васильев, Ю.А. Клоков, А.Я. Шкерстена. – Рига: Зинатне, 1984. – 240 с.  
[13] Данилов Ю.А. Многочлены Чебышева / Ю.А. Данилов. – Минск: Вышэйшая школа, 1984. – 157 с.  
[14] GNU Octave [Электронный ресурс]. – режим доступа: <http://www.gnu.org/software/octave/index.html>. – заголовок с экрана. – Язык англ.  
[15] Ануфриев И.Е., MATLAB 7 / И.Е. Ануфриев, А.Б. Смирнов, Е.Н. Смирнова. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 1104 с.  
[16] Тьюарссон Р. Разреженные матрицы / Р. Тьюарссон. – М.: Мир, 1977. – 172 с.

Стаття надійшла до редакції 26.05.2020

## МЕТОД РОЗРАХУНКУ УСТАЛЕНИХ ПРОЦЕСІВ В ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛАХ

ПАТАЛАХ Д.Г. Аспірант Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: [patalakh.dmytro@gmail.com](mailto:patalakh.dmytro@gmail.com);

ТИХОВОД С. М. д-р техн. наук, доцент, завідувач кафедри теоретичної та загальної електротехніки Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна, e-mail: [stikhovod@gmail.com](mailto:stikhovod@gmail.com);

**Мета роботи.** Розробка методу розрахунку ustalених періодичних процесів складної форми.

**Методи дослідження.** Використана поліноміальна апроксимація функцій, числові методи розв'язання інтегро-диференціальних рівнянь, математичний апарат матричної алгебри, комп'ютерне програмування і методи теорії електричних кіл.

**Отримані результати.** В результаті модифікації відомого методу розрахунку перехідних процесів розроблений метод, який дозволяє безпосередньо виконувати розрахунок ustalених періодичних процесів. Це дозволить скоротити час комп'ютерного моделювання ustalених електричних процесів в лінійних електричних колах. Показаний приклад застосування запропонованого методу. На підставі розробленого методу складена комп'ютерна програма для розрахунку ustalеного процесу в модельному колі. Даний приклад показав скорочення процесорного часу на 45% в порівнянні з застосуванням відомих методів.

**Наукова новизна.** Процеси в електричних колах описуються інтегро-диференціальними рівняннями. При їх вирішенні використана апроксимація функцій похідних струмів від часу рядами по ортогональних поліномах Чебишова. При апроксимації функцій поліноми Чебишова мають рівномірність похибки в усьому діапазоні зміни аргументу. Це вигідно виділяє їх з ряду інших ортогональних функцій. У запропонованому методі використана поліноміальна апроксимація не самій функції рішення, а її похідної. Сама функція знаходиться операцією інтегрування. Ця операція має малу похибку в порівнянні з операцією диференціювання. Безпосередній розрахунок ustalеного періодичного процесу досягається тим, що початкові умови для струмів і їх похідних на початку періоду беруться як значення цих же функцій в кінці періоду. У запропонованому методі інтегро-диференціальні рівняння стану перетворюються в лінійні алгебраїчні рівняння. Запропоновано методу складання єдиної системи лінійних алгебраїчних рівнянь. Вирішення цієї системи дозволяє безпосередньо виконувати розрахунок ustalених періодичних процесів.

**Практична цінність.** Розроблений метод відкриває нову можливість використання різноманітного апарату теорії електричних кіл для роботи з зображеннями струмів. На підставі цього методу розробляється універсальний програмний комплекс для розрахунку ustalених періодичних процесів в електричних колах довільної складності. Це дозволить скоротити процесорний час моделювання складних кіл.

**Ключові слова:** ustalений процес; числові методи; схемна модель; поліноміальна апроксимація; поліноми Чебишова.

## METHOD OF CALCULATION OF STEADY-STATE PROCESSES IN ELECTRICAL CIRCUITS

PATALAKH D. Postgraduate student of National University "Zaporizka politekhnika", Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: [patalakh.dmytro@gmail.com](mailto:patalakh.dmytro@gmail.com);

TYKHOVOD S. Doctor technical sciences, Assoc. Prof., Chief of the department of the Theoretical and general electronics, National University "Zaporizka politekhnika", Ukraine, e-mail: [stikhovod@gmail.com](mailto:stikhovod@gmail.com)

**Purpose.** Development of a method for calculating established periodic processes of complex shape

**Methodology.** Polynomial approximation of functions, numerical methods for solving integro-differential equations, mathematical apparatus of matrix algebra, computer programming and methods of electric circuit theory are used.

**Findings.** As a result of modification of the known method for calculating transient processes, a method has been developed that allows you to directly perform the calculation of steady-state periodic processes. This will reduce the time of computer simulation of electrical processes in linear electrical circuits. An example of using the proposed

method is shown. Based on the developed method, a computer program for calculating the steady-state process in the model circuit is worked out. This example shows a 45% reduction in CPU time compared to the use of known methods.

**Originality.** Processes in electrical circuits are described by integro-differential equations. The approximation of functions of current derivatives to time by series on orthogonal Tchebyshev's polynomials is used in their solution. When approximating functions, Chebyshev polynomials have uniform error in the whole range of argument change. It is advantageous stand out them from a number of other orthogonal functions. The proposed method uses a polynomial approximation not of the solution function itself, but of its derivative. The function itself is obtained with the help of integration operation. This operation has a small margin of error compared to the differentiation operation. The direct calculation of the steady-state periodic process is achieved by taking the initial conditions for currents and their derivatives at the beginning of the period as the values of the same functions at the end of the period. In the proposed method, integro-differential equations of state are transformed into linear algebraic equations. A method for creating a unified system of linear algebraic equations is proposed. The solution of this system allows you to perform directly the calculation of steady-state periodic processes.

**Practical value** The developed method opens a new possibility of using a diverse apparatus of the electric circuits theory to work with images of currents. Based on this method, a universal software package is developed for calculating steady-state periodic processes in electrical circuits of arbitrary complexity. This will reduce the CPU time for modeling complex circuits.

**Keywords:** steady-state process, numerical methods, circuit model, polynomial approximation, Tchebyshev's polynomial.

## REFERENCES

- [1] Demirchyan, K.S., Nejman, L.R., Korovkin, N.V., Chechurin, V.L. (2003). *Teoreticheskie osnovy` e`lektrotekhniki*. Vol. 2, Piter, 567.
- [2] Ortega, Dzh. (1986). *Vvedenie v chislenny`e metody` resheniya differentsial`ny`kh uravnenij*. Moscow, Nauka, 288.
- [3] Segeda, M.S. (2002). *Matematichne modelyuvannya v elektroenergetici*. L`vi`v: L`vi`vs`ka poli`tekhnika, 300.
- [4] Zig`mund, A. (1965). *Trigonometricheskie ryady`*. Vol. 2. Moscow, Mir, 538.
- [5] Aprille, T.J., Trisk, T.N. (1972). Steady state analysis of nonlinear circuits with periodic inputs. *IEEE Trans. Circuit Theory*, Vol. 60, No 1, 108-114.
- [6] Malyar, V.S., Dobushovs`ka, G.A. (2011) *Rozrakhunok ustalenykh rezhimiv u nelinejnykh elektrichnykh kolakh z reaktivnymi elementami i` nesinusoidnymi dzherelami zhivlennya. Vi`snik Naczi`onal`nogo universitetu "L`vi`vs`ka poli`tekhnika", Elektroenergetichni` ta elektromekhanichni` sistemi*. No 707, 82-86.
- [7] Malyar V.S., (2000). *Rozrakhunok statichnykh kharakteristik peri`odichnykh procesiv diferentsial`nim splajn-metodom. Teoretichna elektrotekhnika*, No 55, 37-42.
- [8] Tikhovod, S.M., (2001). *Metod rascheta ustanovivshixsya i perekhodny`kh processov v slozhny`kh nelinejny`kh czepyakh. E`lektrotekhnika i e`lektroenergetika*, No 2, 5-9.
- [9] Tikhovod, S.M. (2007). *Sovershenstvovanie metodiki rascheta ustanovivshixsya processov v e`lektricheskikh czepyakh peremennogo toka. Elektrotekhnika ta elektroenergetika*, Vol. 2, 29-33.
- [10] Lomonosov, V.Yu., (1952). *Periodicheskie processy` v ne-linejny`kh czepyakh. E`lektrichestvo*. Vol. 7, 55-58.
- [11] Patalakh, D.G., (2019). *Modifikacziya metoda chislennogo rascheta perekhodny`kh processov v e`lektricheskikh czepyakh na osnove polinomov Cheby`sheva. Elektrotekhnika ta elektroenergetika*, Vol. 4, 11-24.
- [12] Vasil`ev, N.I., Klovov, Yu.A., Shkerstena, A.Ya., (1984). *Primenenie polinomov Cheby`sheva v chislennom analize*. Riga, Zinatne, 240.
- [13] Danilov, Yu.A., (1984). *Mnogochleny` Cheby`sheva*. Minsk, Vy`she`jshaya shkola, 157.
- [14] GNU Octave [E`lektronny`j resurs]. – rezhim dostupa: <http://www.gnu.org/software/octave/index.html> . – zagolovok s e`krana . – Yazyk angl.
- [15] Anufriev, I.E., Smirnov, A.B., Smirnova, E.N., (2005). *MATLAB 7. BKhV-Peterburg*, 1104.
- [16] T`yuarsson, R. (1977). *Razrezhenny`e matriczy`*. Moscow, Mir, 172 s.

UDC 621.314

## IMPROVEMENT OF THE EVALUATION METHOD OF CALCULATION OF POWER LOSSES IN POWER TRANSFORMER

**PIDLISNIY O.S.** Student of the Faculty of Electrical Engineering of the National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: opodlesny14@gmail.com;  
**LUSHCHIN S.P.** Ph.D, Associate professor, Associate professor of the department of physics of the National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: luschin@zntu.edu.ua;

**Purpose.** The purpose of the work is to perform analytical analysis of methods for calculating power losses of a power transformer and to improve the estimation method of calculation to increase the accuracy of calculating power losses on the example of an industrial power transformer.

**Methodology.** Analytical and calculation method was used to determine power losses in the power transformer.

**Findings.** Analysis of the main power losses of power transformers is an important task to determine the optimal conditions for their operation. Analytical analysis of transformer power loss calculation methods is carried out. The relative contribution of different types of power losses is shown. The calculation of energy losses of the power transformer TM 1000/10/0.4 is performed. The losses of active and reactive energy of the transformer are determined. The efficiency of the power transformer is calculated. A generalizing formula for determining the efficiency of the transformer is proposed.

**Originality.** On the basis of the analytical analysis of methods of calculation of power losses of the power transformer the estimation technique is improved and calculation of losses of active and reactive energy of the industrial power transformer TM 1000/10/0.4 is carried out. A new generalizing formula for determining the efficiency of a power transformer, which takes into account the operating time of the transformer at maximum load, is proposed.

**Practical value.** The estimation method for calculating the power losses of an industrial power transformer under load is improved, in which a generalizing formula for determining the efficiency of a transformer is applied. The proposed technique simplifies the calculations, reduces the estimated time to determine the operating parameters of the power transformer with the required accuracy. The proposed technique was tested on the example of the power transformer TM 1000/10/0.4. It is shown that with increasing maximum load time, the efficiency of the transformer increases and asymptotically approaches the maximum value.

**Keywords:** power losses; power transformer; efficiency; analytical and calculation method, transformer efficiency.

### I. INTRODUCTION

A transformer is a static electromagnetic device in which there are no rotating parts and, consequently, no mechanical losses. All losses in the transformer are losses of active power that occur in the magnetic system, windings and other parts of the transformer in different modes of its operation.

Today there is a reduction in industrial load, the introduction of generation through alternative (renewable) power sources, the emergence of powerful agricultural consumers of electricity. As a result, there is a need to design new or upgrade existing power networks, which must meet modern requirements for energy efficiency and reliability. This requires the application of new improved methods for calculating the parameters of power networks, one of the main elements of which are distribution power transformers. The accuracy of calculating the operating parameters of transformers will depend on the accuracy of calculating the parameters of power networks and the efficiency and reliability of their operation. Therefore, determining the optimal method for calculating the power loss of the power transformer and its adaptation to mod-

ern needs in terms of accuracy and computational efficiency of its parameters is an urgent task.

This problem can be solved by improving the estimation technique for calculating the power loss of a power industrial transformer for practical engineering applications, which will increase the accuracy of calculating the operating parameters of the power unit as a component of the electrical network.

### II. ANALYSIS OF RECENT RESEARCHES

Based on the analysis of works on methods of calculating power losses of power transformers, we can identify the main works of foreign [1] - [3] and domestic authors [4] - [5]. It is shown that when the transformer operates at idle or under load, in the magnetic circuit of the device, electrically insulated windings and other structural elements of the device, part of the active power of the transformer decreases. Losses are variable, so the efficiency of the devices is different and never reaches 100%.

In [6] the information on the electromagnetic field of transformers and reactors, methods of calculation of parameters in the operating mode, experiments with idle



load and short circuit, classification, measurement methods and ways to reduce additional losses are given.

In [7] the main theoretical provisions and principles for determining and analyzing electricity losses in electrical networks by the criterion of minimum cost of electricity transmission are developed. The methodology and practice of calculations of electricity losses in 6-20 kV distribution networks are given.

In the article [8] the review of analytical and empirical methods of calculation of losses and heating of elements of a design of the power transformer equipment with oil cooling is resulted, the basic simplifying assumptions are specified.

In the article [9] the calculation of losses in structural elements of power transformers and reactors by the finite element method with boundary conditions of impedance type is carried out. A mathematical model based on the application of the finite element method is proposed, which allows to more efficiently models eddy currents and losses caused by field scattering in the tank of power transformers and reactors and elements of their structures.

In the article [10] the analytical calculation of magnetization current is applied. Analytical and numerical calculations of the magnetic field and losses, as well as computational and empirical methods for estimating temperature rise are used. For a five-rod transformer with a power of 630 MVA under the action of geomagnetic currents, increased losses and heating of structural elements on the rods of the magnetic system, reservoir and increased sound level are determined.

The article [11] presents an overview of current researches on the problem of transformer losses, especially in terms of practical engineering applications. This reveals that the problem of transformer losses remains an active area of research. The article classifies the problems of transformer losses into three main groups: losses of the tank due to the power currents of the bushings, losses in the connections of the transformer core and losses in the transformer tank.

The article [12] considers the subject of distribution transformers no-load losses and the factors that influence these losses. This paper reviews methods to correct errors in no-load loss measurement caused by excitation voltage distortion and temperature. These methods depend on the ability to separate no-load losses into its hysteresis and eddy current loss components. Accordingly, methods used to separate the no-load losses into its constituent parts are also reviewed.

The article [13] discusses the theoretical issues underlying the calculation of active, reactive power and energy losses in medium / low voltage transformers. Maintaining a balance of active and reactive power is of key importance for the flawless functioning of the power system and the receipt of high-quality electricity. Based on the parameters of transformers and data from consumers measuring active and reactive power, active and reactive

power and energy losses were obtained in order to assess the efficiency of transferring active power and energy through medium / low voltage transformers.

The article [14] considers the problems of increasing the power losses of the magnetic cores of power transformers that have been operating for a long time. The degree of influence of service life and repair of power transformer cores on the increase of idle losses without idling and analytical dependence of change of dynamics in time of magnitude of power losses in cores of energy transformers of 150 kV is found. Recommendations for refinement of calculation of power losses without load in distribution network transformers are developed.

The article [15] is devoted to the development and research of a universal mathematical model of the 0.38 kV electric network for calculations of power losses and electric energy on the basis of information on voltage losses in power lines.

The article [16] is devoted to the main methods of estimating additional power losses in the basic elements of power consumption and power supply systems caused by the presence of voltage and current asymmetry. An analysis of existing methods for determining additional power losses in the main elements of power supply systems is carried out. It is shown that the presence of amplitude and angular asymmetry in the network leads to an increase in additional power losses in comparison with the symmetric mode.

Today, methodological recommendations are used to determine the technological costs of electricity in transformers and transmission lines [17], which are recommended by the Ministry of Energy and Coal of Ukraine to determine the technological costs of electricity in power network elements - power transformers, transmission lines and reactors. In these guidelines, the technological costs of electricity include energy losses due to electromagnetic processes in the conductive parts of the electrical network and the cores of the devices during its transmission, as well as climatic losses and energy losses in the insulation of network elements.

The analysis of previous studies presented in the above works shows that many methods of calculating power losses of power transformers are based on analytical methods of calculation using mathematical modeling of electromagnetic processes in a power transformer. The choice for the practical engineering application of a method of calculating losses is often complicated by the cumbersomeness of mathematical calculations, which are not always justified in the conditions of industrial operation of power units. Therefore, there is a need to improve calculation methods in terms of practical engineering applications.

### III. FORMULATION OF THE WORK PURPOSE

The purpose of the work is to perform an analytical analysis of methods for calculating power losses of the power transformer and improve the evaluation method of

calculation to perfect the accuracy of calculating power losses on the example of an industrial transformer.

#### IV. PRESENTATION OF THE MAIN MATERIAL AND ANALYSIS OF THE RESULTS

The power transformer is designed to convert and transmit electrical energy without changing its power. During the operation of the transformer, energy losses occur, which are associated with the conversion of part of the electrical energy into heat, which is heated by the device and dissipated in the surrounding space. The loss of electrical energy in the transformer consists of the main components: electrical losses in the electrical windings of the transformer, magnetic losses in the magnetic circuit and additional losses.

##### 4.1. Electrical losses

Heating of the transformer coils during the passage of current causes electrical losses and reduced power. Such losses on average on the network account for 5% of the total amount of energy consumed.

When the load is applied to the transformer, the electromagnetic energy from the primary winding is transferred to the secondary coil. Electrical losses are equal to the sum of losses in the transformer windings. Electrical losses in the primary and secondary windings of the transformer are determined in proportion to the squares of the currents of both coils and their resistances [1]:

$$\Delta P_{EL} = I_1^2 r_1 + I_2^2 r_2,$$

where  $I_1$  and  $I_2$  are the load currents of the primary and secondary windings of the transformer;  $r_1$  and  $r_2$  are the resistances of the winding conductors.

Thus, there is a dependence of  $\Delta P_{EL}$  losses on the required amount of power to the final consumer. There are fluctuations in load costs in a specific time interval, so the electrical losses in the windings are different within a day, are variable and "tied" to the load modes.

To reduce electrical losses, the windings of transformers are made mainly of copper, and the cross section of the wires of the coils is increased.

##### 4.2. Magnetic losses

Magnetic losses are associated with processes in the magnetic circuit of the transformer under the action of an alternating magnetic field. The causes of losses are magnetization reversal of the transformer core due to hysteresis and eddy currents (Foucault currents).

The magnetization reversal of the transformer core due to hysteresis is due to the fact that in ferromagnets there are zones of spontaneous magnetization-domains. The magnetic moments of the core domains are characterized by a chaotic orientation, so outside the influence of the external field of magnetization, the final magnetic moment of the ferromagnet is close to zero. Under the action of a magnetic field, domains change the direction of their own magnetization in the direction of the magnetization field. As a result, the domains are reoriented,

their size increases and the ferromagnet is magnetized. With each reversal cycle, some work is expended, the magnitude of which is proportional to the area of the hysteresis loop. Work contributes to the thermal heating of the core and causes additional energy consumption.

The occurrence of eddy currents (Foucault currents) in the core of the transformer occurs under the action of an alternating magnetic field, which generates an alternating eddy electric field. Eddy currents also cause heating.

The magnitude of magnetic losses is determined by the properties of the ferromagnetic material of the core and depends on the magnitude of the magnetic flux and its frequency. At a constant magnitude of the magnetic flux, the magnetic losses remain unchanged when changing the mode of the transformer operation (load change). In the nominal mode of operation, their value is the same as in the idle mode and they are determined by the idle power of the transformer.

To reduce power losses in the core, use a magnetically soft material with high magnetic permeability and low coercive force. To compensate for the action of eddy currents, the magnetic circuit is made of electrically insulated plates, and the steel is specially alloyed with silicon [3], [18] - [19].

##### 4.3. Additional losses

In addition to the main losses in the coils and magnetic circuit of the transformer, there are additional losses. They occur in other steel elements of the transformer structure - in the walls of the cooling tank for heat loss, yoke beams, pressing rings. Additional losses account for up to 10% of total losses and can often be ignored.

Additional losses of active power of static electromagnetic equipment also occur as a result of asymmetry of currents, which is caused by the inclusion in the power supply system of consumers, which reduces the quality of electricity [16]. In multiphase transformers, the nature of the processes is not affected by the order of phase shift, but asymmetric loads lead to losses of active power. The asymmetry of the input voltages causes the asymmetry of the output voltages, which is due to the flow of currents in the reverse sequence.

On the basis of magnetic, electric and additional losses determine the total energy loss of the power transformer.

##### 4.4. Efficiency

Efficiency is calculated as the ratio of useful energy and energy consumption [20]. The reduction of energy in the power unit consists of magnetic losses occurring in the magnetic circuit and electrical losses generated in the transformer windings. The following values are used for calculations:

- active power  $P_1$  obtained from the power supply;
- active power  $P_2$  transferred to the final consumer;
- electrical losses  $\Delta P_{EL}$  occurring in the transformer windings;

- magnetic losses  $\Delta P_M$ , which are formed in the core;
- additional power losses  $\Delta P_{ADD}$  arising in other structural elements and components on average up to 10% of all losses.

To calculate  $\Delta P_{EL}$  use the formula [21]:

$$\Delta P_{EL} = \Delta P_{EL,NOM} \beta^2,$$

where  $\Delta P_{EL,NOM}$  - electrical losses at nominal current of the transformer,  $\beta$  - load factor. Nominal electrical losses are determined based on passport data, or experimentally based on the test results of the transformer.

The value of  $\Delta P_M$  is calculated by the formula [21]:

$$\Delta P_M = \Delta P_H + \Delta P_{EC},$$

where  $\Delta P_H$  - hysteresis losses;  $\Delta P_{EC}$  - losses due to eddy currents.

The efficiency of the transformer is calculated by the formula [21]:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{(P_2 + \Delta P_M + \Delta P_{EL})},$$

where  $\eta$  is assumed to be zero when the transformer is not operating, and its power is used to compensate for magnetic losses.

For a more accurate calculation of efficiency, additional energy consumption is taken into account, which occurs not in the magnetic circuit and winding, but in other elements of the power unit.

4.5. Methodical principles of calculation of energy losses of elements of electric networks

The main methodological principles for calculating energy losses of electrical network elements are developed in detail and set out in [7]. For a single network element with active resistance  $R$ , load losses of electricity are determined by the relationship [7]:

$$\Delta W_L = 3R \int_0^T I^2(t) dt.$$

The analytical function that describes the law of current change over time is often unknown, so in practice various methods are used to integrate this relationship numerically, which determine the main methodological approaches to calculating the load losses of electricity in the elements of electrical networks.

The most widely used method in practice is the method of average loads. According to this method, the load losses of electricity are determined by the formula [7]:

$$\Delta W_L = 3RI_{av}^2 k_F^2 T = \frac{W_A^2 + W_R^2}{U_{av}^2 T} R k_F^2,$$

where  $I_{av}$  is the average value of the current,  $U_{av}$  is the average value of the voltage,  $k_F$  is the coefficient of the form of the graph,  $T$  is the calculated time period,  $W_A$  is the active electricity,  $W_R$  is the reactive electricity.

Electricity losses in the elements of the electrical

network are determined by the results of measurements as the difference between the volumes of electrical energy calculated from the simultaneously taken readings of meters installed at the input and output elements of the electrical network. In case of technical impossibility or economic inexpediency of loss measurement, they are determined by calculation in accordance with the methodological recommendations for determining the technological costs of electricity in transformers and power lines [17]. According to this method, the losses of active and reactive energy in transformers are calculated by a formula that takes into account electrical and magnetic losses.

4.6. Calculation of energy losses in the transformer TM 1000/10/0.4

The power transformer with a nominal power of 1000 kVA and a nominal voltage of 10 kV is involved in the work. The initial data for calculating the energy losses in the transformer are shown in Table 1.

**Table 1.** Initial data

Indicator	Expression	Value
Nominal power, kVA	$S_{NOM}$	1,000
The voltage is rated based on the parameters of the network 10 / 0.4, kV	$U_{NOM}$	10
Transmitted active electricity, kWh	$W_A$	53,954
Transmitted reactive electricity, kvarh	$W_R$	39,062
Short-circuit losses, kW	$P_{SC}$	10.5
Costs in idle mode, kW	$P_0$	1.4
Time worked under load, h	$T_{HW}$	1,000
Maximum load time, h	$T_M$	900
Time of greatest losses, h	$t$	100
Power factor	$\cos \varphi$	0.81

The device worked for 1000 hours in operating mode, and part of the time the transformer operated at maximum load, and part of the time converted electricity with the greatest losses. We apply the method of calculating the power losses in the power transformer [22], which is based on the methodology of [7] and allows you to estimate the power losses depending on the operating modes of the transformer. The following condition is used to

calculate the consumption of the maximum possible energy of the transformer during  $T_M$  [22]:

$$W_{A,M} \leq 0.9 S_{NOM} \cos \varphi \cdot T_M.$$

From this value of the condition  $W_{AM}$  is equal to:

$$W_{A,M} = 656,100 \text{ kWh}.$$

Accordingly, the time of maximum load of  $T_M$  is 900 h, and the time of the largest losses  $t$  will be 100 h. The power factor is found by the formula:

$$\cos \varphi = \frac{W_A}{\sqrt{W_A^2 + W_R^2}} = 0.81.$$

Constant energy losses depend on the idling costs and are [22]:

$$\Delta W_{0,A} = P_0 T_{HW} = 1,400 \text{ kWh},$$

$$\Delta W_{0,R} = \Delta Q_0 T_{HW} = 20,953.2 \text{ kvarh},$$

where  $\Delta Q_0$  is losses of reactive power at idling cost:

$$\Delta Q_0 = \sqrt{\left(\frac{I_0 \%}{100} S_{NOM}\right)^2 - P_0^2} = 20.953 \text{ kvar},$$

where  $I_0 = 2.1\%$  is coefficient of current at idling cost.

To calculate the variable losses of active energy in the calculation period, the formula [22] is used:

$$\Delta W_{S,A} = P_{SC} t \left( \frac{W_A^2 + W_R^2}{T_M^2 S_{NOM}^2} \right) = 5.75 \text{ kWh},$$

reactive energy [22]:

$$\Delta W_{S,R} = \Delta Q_{SC} t \left( \frac{W_A^2 + W_R^2}{T_M^2 S_{NOM}^2} \right) = 23.97 \text{ kvarh},$$

where  $\Delta Q_{SC}$  is short-circuit losses of power [22]:

$$\Delta Q_{SC} = \sqrt{\left(\frac{U_{SC} \%}{100} S_{NOM}\right)^2 - P_{SC}^2} = 43.757 \text{ kvar},$$

where  $U_{SC} = 4.5\%$  is coefficient of short-circuit losses of voltage.

Active energy losses in the calculation period are:

$$\Delta W_A = \Delta W_{0,A} + \Delta W_{S,A} = 1,405.75 \text{ kWh}.$$

Reactive energy losses in the calculation period are:

$$\Delta W_R = \Delta W_{0,R} + \Delta W_{S,R} = 20,977 \text{ kvarh}.$$

So, calculation results of active and reactive energy losses in the calculation period are:

- active energy losses are 1,405.75 kWh,

- reactive energy losses are 20,977 kvarh.

General energy losses in the calculation period are:

$$\Delta W = \Delta W_A + \Delta W_R.$$

Converting reactive energy losses to units of kWh:

$$\Delta W_R (\text{kWh}) = \Delta W_R (\text{kVAh}) \cdot \cos \varphi = 16,991.37 \text{ kWh}.$$

Thus, the general energy losses in the calculation period are:

$$\Delta W = \Delta W_A + \Delta W_R = 18,397.12 \text{ kWh}.$$

Then we can calculate the efficiency of the transformer by the formula:

$$\eta = \frac{W_{A,M} - \Delta W}{W_{A,M}} = 0.972.$$

Thus, the efficiency of the transformer is  $\eta = 97.2\%$ .

The given method of calculation allows to derive the generalized formula of dependence of efficiency on time of the maximum loading and time of the greatest losses of the transformer. The resulting formula is as follows:

$$\eta = 1 - A \frac{1}{T_M} - B \frac{t}{T_M^3},$$

where the coefficients  $A$  and  $B$  are equal to:

$$A = \frac{(P_0 + \Delta Q_0) T_{HW}}{0.9 S_{NOM} \cdot \cos \varphi},$$

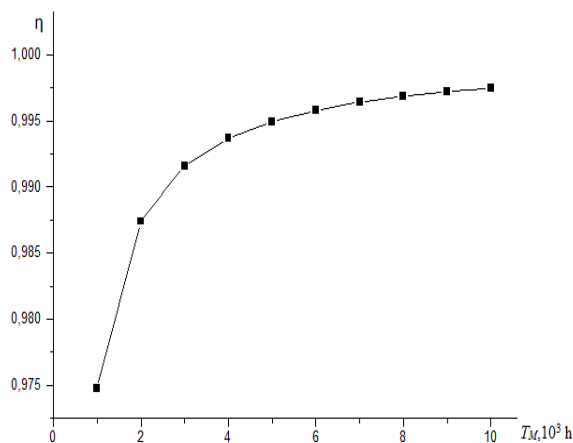
$$B = \frac{(P_{SC} + \Delta Q_{SC}) \cdot (W_A^2 + W_R^2)}{0.9 S_{NOM} \cdot \cos \varphi}.$$

The numerical values of the coefficients  $A$  and  $B$  for the conditions of this example are equal to:  $A = 25.2$  h,  $B = 246.5 \text{ h}^2$ . Then the generalized formula for calculating the efficiency for this example will be written as follows:

$$\eta = 1 - 25.2 \frac{1}{T_M} - 246.5 \frac{t}{T_M^3}.$$

To compare the results, the efficiency was calculated according to the method of calculating electricity consumption according to the normative document of the Ministry of Energy and Coal of Ukraine "Methodological recommendations for determining the technological consumption of electricity in transformers and transmission lines" [17]. The calculation according to this method showed that for the transformer TM 1000/10/0.4 the efficiency is equal to  $\eta = 97.1\%$ . This result almost coincides with the value of efficiency, which was obtained by us in the applied method using a generalizing formula to determine the efficiency of the transformer TM 1000/10/0.4.

The graph of relationship of efficiency on time of the maximum loading at the set time of the greatest losses of the transformer has the following view:



**Figure 1.** Graph of efficiency relationship on the time of maximum load at a given time of the largest losses of the transformer

The analysis of the obtained results allows us to state that the relationship of efficiency on the time of maximum load of the transformer at a given time of the greatest losses of the transformer has the form of a function that asymptotically approaches the maximum value with increasing  $T_M$  value.

## V. CONCLUSIONS

1. Analytical analysis of methods for calculating power losses in the power transformer is carried out. It is established that many methods are based on analytical calculation methods using mathematical modeling of electromagnetic processes in a power transformer. The choice for the practical engineering application of a method of calculating losses is often complicated by the cumbersome nature of mathematical calculations, which are not always justified in the conditions of industrial operation of power units.

2. Improved estimation technique for calculating power losses of the power transformer, which allows to estimate power losses depending on the operating modes of the transformer and find the value of the efficiency. A generalizing formula for determining the efficiency of the transformer is proposed. It is shown that with increasing maximum load time, the efficiency of the transformer increases and asymptotically approaches the maximum value.

3. The calculation of energy losses of the industrial power transformer TM 1000/10/0.4 is performed. The losses of active and reactive energy of the power transformer are determined. The efficiency of the transformer at a maximum load time of 900 hours and a time of maximum losses of 100 hours is 97.2%. This value of efficiency almost coincides with the efficiency obtained by the method of calculating electricity consumption according to the normative document of the Ministry of Energy and Coal of Ukraine.

## REFERENCES

- [1] Kulkarni S.V., Khaparde S.A. (2013). Transformer Engineering Design, Technology, and Diagnostics. CRC Press, 742.
- [2] Moser H.P., Dahinden V. (1999). Transformerboard 2. Graphics DOK MAN, 222.
- [3] Larin V.S. (2015). Silovye transformatory. Moskva, Znack, 391.
- [4] Silovye transformatory. Spravochnaja kniga (2004)/ Pod red. S.D. Lizunova, A.K. Lohanina. M. Jenergoizdat, 616 s.
- [5] Biki, M. A. (2013). Proektirovanie silovyh transformatorov. Raschety osnovnyh parametrov. M. Znack, 612.
- [6] Lejtes, L. V. (1981). Jelektromagnitnye raschety transformatorov i reaktorov. M. Jenergija, 392.
- [7] Fursanov M.I. (2005). Opredelenie i analiz poter' jelektrojenergii v jelektricheskijh setjah jenergosistem. — Mn.: UVIC pri UP «Beljenergosberezhenie», 208.
- [8] Ivankov, V., Basova, A., & Shulga, N. (2014). Electric-heatings calculation models of structural elements of transformer equipment. Electrical Engineering and Power Engineering, 2, 41-53. doi:http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2014-2-6
- [9] Ostrenko, M., & Tykhovod, S. (2016). Raschet poter' v jelementah konstrukcii silovyh transformatorov i reaktorov metodom konechnykh jelementov s granichnymi uslovijami impedansnogo tipa. Elektrotehnika i elektroenergetika, 2, 33-42. doi:http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2016-2-4
- [10] Ivankov, V., & Basova, A. (2019). Calculation of the geomagnetic induced currents impact on the high-power transformer. Electrical Engineering And Power Engineering, 4, 8-20. doi:http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2019-4-1
- [11] Juan C. Olivares-Galván, Pavlos S. Georgilakis & Rodrigo Ocon-Valdez (2009). A Review of Transformer Losses. Electric Power Components and Systems, 37:9, 1046-1062, DOI:10.1080/15325000902918990
- [12] Takach, D. S., Boggavarapu, R. L. (1985). Distribution transformer noload losses. Power Appar. Syst. IEEE Trans., 1, 181-193. DOI: 10.1109/TPAS.1985.318892
- [13] Michal Kolcun, Anna Gawlak, Miroslaw Kornatka, Zsolt Čonka (2020). Active and Reactive Power Losses in Distribution Transformers. Acta Polytechnica Hungarica, 17, 1, 161-174.
- [14] Krasovskiy, P. (2015). Calculation of power losses in power transformers considering the operation life. Electrification of Transport, 10, 74-80.
- [15] Zorin, V., Buyniy, R., & Perepecheniy, V. (2015). Modeli i metody rascheta i ocenki poter' moshhnosti i jelektricheskoy jenerгии v raspredelitel'nyh setjah 0,38 kV. Jenergosberezhenie. Jenergetika. Jenergoaudit, 5, 19-27.
- [16] Ded, A.V., Parshukova, A.V., Halitov, N.A. (2015).

- Ocenka dopolnitel'nyh poter' moshhnosti ot nesimetrii naprjazhenij i tokov v jelementah sistem jelektrosnabzhenija. Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyh i fundamental'nyh issledovanij, 10-3, 421-425.
- [17] Metodichni rekomendacii viznachennja tehnologichnih vitrat elektrichnoї energii v transformatorah i linijah elektropredavannja. <https://www.energy.mk.ua/index.php/77-akcia-razdel/akcia-kategoria/634-metodika9.html>
- [18] Strnat, K.J. (1990). Modern Permanent Magnets for Application in Electro-Technology. Proceedings of the IEEE, 78, 6, 923-925. DOI: 10.1109/5.56908
- [19] G. Bertotti, (1988). General properties of power losses in soft ferromagnetic materials. Magn. IEEE Trans., 24, 1, 621-630. DOI: 10.1109/20.43994
- [20] Stefan Fassbinder (2013). Efficiency and Loss Evaluation of Large Power Transformers, ECI Publication No Cu0144, Issue 01, Available from [www.leonardo-energy.org](http://www.leonardo-energy.org).
- [21] Proskurjakov, V.S., Sobolev, S.V. (2009). Tehnicheskie dannye i jekspluatacionnye harakteristiki transformatora. Virtual'nyj praktikum. Uchebnoe jelektronnoe tekstovoe izdanie. Ekaterinburg, GOU VPO UGTU–UPI, 26.
- [22] <https://opori-osveshenia.ru/sovety/elektricheskie-poteri.html>

The article was received 04.05.2020

## ВДОСКОНАЛЕННЯ ОЦІНОЧНОЇ МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ ВТРАТ ПОТУЖНОСТІ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

- ПІДПИСНИЙ О.С. студент електротехнічного факультету Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: [opodlesny14@gmail.com](mailto:opodlesny14@gmail.com);
- ЛУЩИН С.П. канд. фіз.-матем. наук, доцент кафедри фізики Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: [luschin@zntu.edu.ua](mailto:luschin@zntu.edu.ua);

**Мета роботи.** Метою роботи є проведення аналітичного аналізу методик розрахунку втрат потужності силового трансформатора і вдосконалення оціночної методики розрахунку для підвищення точності обчислення втрат потужності на прикладі промислового силового трансформатора.

**Методи дослідження.** Аналітико-розрахункові методи для визначення втрат потужності силового трансформатора.

**Отримані результати.** Аналіз основних втрат потужності силових трансформаторів є важливим завданням для визначення оптимальних умов їх роботи. Проведено аналітичний аналіз методів розрахунку втрат потужності трансформатора. Показано відносний внесок різних типів втрат потужності. Виконано розрахунок втрат енергії силового трансформатора ТМ 1000/10/0,4. Визначено втрати активної та реактивної енергії трансформатора. Розраховано коефіцієнт корисної дії силового трансформатора. Запропонована узагальнююча формула для визначення коефіцієнту корисної дії трансформатора.

**Наукова новизна.** На основі аналітичного аналізу методів розрахунку втрат потужності силового трансформатора вдосконалено оціночну методику і проведено розрахунок втрат активної та реактивної енергії промислового силового трансформатора ТМ 1000/10/0,4. Запропоновано нову узагальнюючу формулу для визначення коефіцієнту корисної дії силового трансформатора, яка враховує час роботи трансформатора при максимальному навантаженні.

**Практична цінність.** Вдосконалена оціночна методика розрахунку втрат потужності промислового силового трансформатора під навантаженням, в якій застосована узагальнююча формула визначення коефіцієнта корисної дії трансформатора. Запропонована методика спрощує розрахунки, скорочує розрахунковий час визначення експлуатаційних параметрів силового трансформатора з необхідною точністю. Запропонована методика була випробувана на прикладі роботи силового трансформатора ТМ 1000/10/0,4. Показано, що при збільшенні часу максимального навантаження, коефіцієнт корисної дії трансформатора збільшується і асимптотично наближається до максимального значення.

**Ключові слова:** втрати потужності; силовий трансформатор; аналітично-розрахунковий метод, коефіцієнт корисної дії трансформатора.

## УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ОЦЕНОЧНОЙ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

- ПІДПИСНИЙ О.С. студент електротехнічного факультету Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: [opodlesny14@gmail.com](mailto:opodlesny14@gmail.com);

ЛУЩИН С.П.

канд. физ.-матем. наук, доцент кафедры физики Национального университета «Запорожская политехника», Запорожье, Украина, e-mail: luschin@zntu.edu.ua;

**Цель работы.** Целью работы является проведение аналитического анализа методик расчета потерь мощности силового трансформатора и усовершенствование оценочной методики расчета для повышения точности вычисления потерь мощности на примере промышленного силового трансформатора.

**Методы исследования.** Аналитико-расчетные методы для определения потерь мощности силового трансформатора.

**Полученные результаты.** Анализ потерь мощности силовых трансформаторов является важной задачей для определения оптимальных условий их работы. Проведен аналитический анализ методов расчета потерь мощности трансформатора. Показан относительный вклад различных типов потерь мощности. Выполнен расчет потерь энергии силового трансформатора ТМ 1000/10/0,4. Определены потери активной и реактивной энергии трансформатора. Рассчитан коэффициент полезного действия силового трансформатора. Предложена обобщающая формула для определения коэффициента полезного действия трансформатора.

**Научна новизна.** На основе аналитического анализа методов расчета потерь мощности силового трансформатора усовершенствована оценочная методика и проведен расчет потерь активной и реактивной энергии промышленного силового трансформатора ТМ 1000/10/0,4. Предложена новая обобщающая формула для определения коэффициента полезного действия силового трансформатора, которая учитывает время работы трансформатора при максимальной нагрузке.

**Практическая ценность.** Усовершенствована оценочная методика расчета потерь мощности промышленного силового трансформатора под нагрузкой, в которой применена обобщающая формула определения коэффициента полезного действия трансформатора. Предложенная методика упрощает расчеты, сокращает расчетное время определения эксплуатационных параметров силового трансформатора с требуемой точностью. Предложенная методика была опробована на примере работы силового трансформатора ТМ 1000/10/0,4. Показано, что при увеличении времени максимальной нагрузки, коэффициент полезного действия трансформатора увеличивается и асимптотически приближается к максимальному значению.

**Ключевые слова:** потери мощности; силовой трансформатор; аналитико-расчетный метод, коэффициент полезного действия трансформатора.

## ВПЛИВ НЕЛІНІЙНОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА АВТОНОМНУ ЕЛЕКТРИЧНУ МЕРЕЖУ ПРИ ПАРАЛЕЛЬНІЙ РОБОТІ СИЛОВОГО АКТИВНОГО ФІЛЬТРА

**ВЛАСЕНКО Р.В.** асистент, асистент кафедри систем електроспоживання та енергетичного менеджменту Запорізького національного університету імені Михайла Остроградського, Кременчук, Україна, e-mail: ruslan.vlasenko@i.ua;

**БЯЛОБРЖЕСЬКИЙ О.В.** канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри систем електроспоживання та енергетичного менеджменту Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського, Кременчук, Україна, e-mail: seemal@kdu.edu.ua;

**Мета роботи.** Метою статті є дослідження режимів роботи трифазного силового активного фільтра у складі автономної електричної мережі при підключенні до мережі трифазного нелінійного навантаження різного спектрального характеру.

**Методи дослідження.** Для проведення досліджень використовувалися положення р<sub>q</sub>-теорії потужності, теорія електричних кіл, теорія автоматичного управління, математичне моделювання в пакеті Matlab.

**Отримані результати.** Отримані графіки і спектральний склад напруги мережі, струму навантаження, що дозволяє оцінити ефективність застосування силового активного фільтра у режимі фільтрації у складі автономної електричної мережі, що представляє собою синхронний генератор.

**Наукова новизна.** Доведено ефективність паралельної роботи силового активного фільтра у режимі фільтрації з синхронним генератором при різко змінному нелінійному навантаженні.

**Практична цінність.** Використання запропонованої методики дозволить створити трифазний силовий активний фільтр для застосування його у автономних електричних мережах, що представлені синхронним генератором з автоматичним регулюванням напруги збудження.

**Ключові слова:** силовий активний фільтр, р<sub>q</sub>-теорія потужності, синхронний генератор, якість електричної енергії, нелінійне навантаження.

### І. ВСТУП

У якості джерела живлення змінного струму для автономних електричних мереж або резервного джерела живлення поширення отримали синхронні генератори (СГ). СГ також використовують на потужних теплових, гідро і атомних електростанціях. Але робота СГ при генерації енергії у складі електричних станцій відрізняється від роботи у складі технологічних комплексів чи систем підприємств. Достатньо високі вимоги до якості електричної енергії, які відбиті у нормативних документах, та вимагають відповідних заходів до підтримки показників якості в мережах загального призначення забезпечують генеруючим установкам електричних станцій сприятливі умови функціонування. На відміну від генеруючих установок підприємств де, зважаючи на відсутність жорсткого контролю до якості електричної енергії у вузлах цехових мереж, чи розподільчих та понижуючих підстанцій, синхронні генератори генеруючи установок працюють на несиметричне та нелінійне навантаження [1].

### ІІ. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

При роботі СГ на нелінійне навантаження вини-

кає ряд проблем із забезпеченням якості електроенергії у самій електричній машині. При активно-емнісному навантаженні зміна напруги буде від'ємною величиною. Зміна напруги синхронних генераторів достатньо велика, що ускладнює роботу споживачів. В даний час досконалі швидкодіючі регулятори збудження дозволяють підтримувати заданий рівень напруги. З їх допомогою за необхідним законом змінюється струм збудження, а значить і магнітний потік. При чисто активному і активно-індуктивному навантаженні напруга генератора зі зростанням струму зменшується, а при активно-емнісному навантаженні – зростає. Це пояснюється тим, що в останньому випадку діє поздовжньо-намагнічувальна реакція якоря, що збільшує магнітний потік, а у двох перших – поздовжньо-розмагнічувальна, що зменшує потік. При чисто активному навантаженні обмотка статора володіє значною індуктивністю. Регулюючи напругу збудження СГ компенсують реактивну потужність навантаження та підтримують напругу СГ на заданому рівні [2].

Але при цьому, коли активно-індуктивне або активно-емнісне навантаження зі змінним спектральним складом, то відбувається додатковий вплив на спотворення синусоїдальності форми кривої напруги. СГ



не здатен впливати на зниження вищих гармонік і потребує додаткової установки фільтруючих засобів [3]-[5].

Для компенсації реактивної потужності застосовують і фільтрації вищих гармонік струму застосовують силові активні фільтри (САФ), що здатні знижувати дані величини при зміні амплітуди або спектрального складу навантаження, а також враховувати спотворену напругу мережі живлення при своїй роботі. Також САФ має можливість, як одночасно так і окремо працювати у режимі компенсації-фільтрації чи тільки фільтрації. Його перевага полягає у тому, що при зміні спектрального складу струму навантаження САФ ураховує дані показники у реальному часі [6].

### III. МЕТА РОБОТИ

Метою роботи є дослідження впливу нелінійного навантаження на параметри режиму синхронного генератора з регулюванням напруги збудження у складі автономної електричної мережі з та без паралельного САФ.

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

Спрощена схема електричної мережі підприємства, яку обрано для дослідження наведена на рис. 1, де Н1 – RL навантаження, Н2 – RC навантаження, В1, В2, В3 – вимикачі, СГ – синхронний генератор, ЗГ – збуджувач синхронного генератора, В – випрямляч, ДВЗ-ДГ – дизель генератор, САФ – силовий активний фільтр результатів.

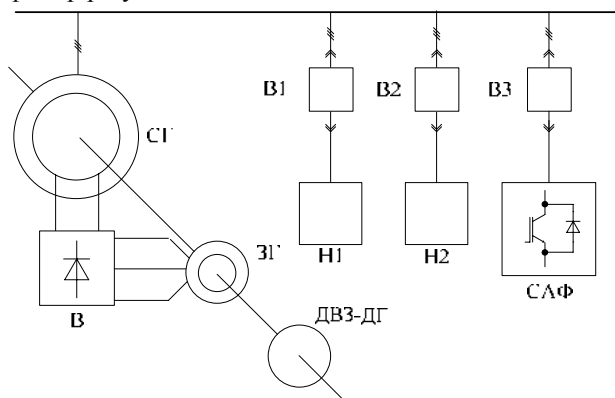


Рисунок 1. Схема системи електричної мережі підприємства з САФ

У СГ система збудження забезпечується невеликою синхронною машиною ЗГ, з'єднаною на одному валу. Випрямлення виконується діодним мостом В, встановленим на синхронному машинному валу, що дозволяє уникнути ковзаючих кілець для забезпечення постійного струму на полі синхронного генератора. Механічне зчеплення СГ і ЗГ здійснюється за допомогою дизель генератора ДВЗ-ДГ. ЗГ є синхронна машина невеликої потужності. СГ є синхронна машина великої потужності, керована дизельним двигуном. Регулювання напруги генератора здійснюється за до-

помогою контролю напруги поля ЗГ. Дизельний двигун забезпечує загальну механічну потужність, необхідну для основної синхронної машини СГ та ЗГ [7]-[9].

**Представлення складових потужності за допомогою  $pq$ -теорії миттєвої потужності.** Ефективність роботи САФ залежить від визначеної компенсаційної характеристики, що підлягає компенсації. Для визначення неактивних складових застосовують різні теорії потужності [10]-[12]. Популярність серед застосовуваних теорій потужностей на базі яких створюється алгоритм визначення заданого струму САФ найбільше отримала –  $pq$ -теорія потужності [13], [14].

Застосовуючи  $pq$ -теорію потужності [10], виконують перетворення миттєвої напруги мережі та миттєвого струму навантаження в координати  $\alpha\beta$ :

$$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix}, \quad (1)$$

де  $x_a, x_b, x_c$  – значення миттєвої напруги мережі або миттєвого струму навантаження в координатах  $abc$ .

Миттєву реальну і уявну потужність навантаження знаходять:

$$\begin{bmatrix} p_l \\ q_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_\alpha & u_\beta \\ u_\beta & -u_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{l\alpha} \\ i_{l\beta} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

де  $u_\alpha, u_\beta$  – миттєва напруга мережі в координатах  $\alpha\beta$ ;  $i_{l\alpha}, i_{l\beta}$  – миттєвий струм навантаження в координатах  $\alpha\beta$ .

Миттєву реальну і уявну потужність представляють двома складовими: постійною  $P_l, Q_l$  та змінною  $\tilde{p}_l, \tilde{q}_l$ :

$$\begin{aligned} p_l &= P_l + \tilde{p}_l \\ q_l &= Q_l + \tilde{q}_l \end{aligned} \quad (3)$$

Постійну реальну і уявну потужність визначають інтегруванням:

$$P_l = \frac{1}{T} \int_0^T p dt; \quad Q_l = \frac{1}{T} \int_0^T q dt, \quad (4)$$

де  $T$  – період напруги мережі:

Звичайно на САФ покладають функцію компенсації  $\tilde{p}_l$  і  $\tilde{q}_l$ , тобто компенсація реактивної потужності за основною гармонікою і фільтрація вищих гармонік струму. Але можливо застосовуючи алгоритм визначення заданого струму САФ на основі  $pq$ -теорії потужності покласти функцію компенсації  $\tilde{p}_l$  і  $\tilde{q}_l$ , тобто робота САФ у режимі фільтрації вищих гармонік струму. Тоді заданий струм САФ в координатах  $\alpha\beta$  відповідно для першого і другого варіанту буде:

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{(u_\alpha^2 + u_\beta^2)} \begin{bmatrix} u_\alpha & u_\beta \\ u_\beta & -u_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_l \\ q_l \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{(u_\alpha^2 + u_\beta^2)} \begin{bmatrix} u_\alpha & u_\beta \\ u_\beta & -u_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_l \\ q_l \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Визначення заданого струму САФ в координатах  $abc$  виконують шляхом зворотного перетворення (1) [10].

**Моделювання у візуальному середовищі.** Для дослідження впливу трифазного нелінійного навантаження на процеси розподілу електричної енергії у вузлі системи електроспоживання (рис. 1) в пакеті візуального програмування за аналогією з [7] складена модель (рис. 2) з паралельним підключенням трифазного САФ.

Модель рис. 2 включає: Synchronous Generator 2MVA 400V – СГ, Field Connection – система регулювання напруги збудження СГ, Rectifier – випрямляч, Transformer 10kVA 400V/12V – трансформатор потужністю 10 кВА, Exciter System 8,1kVA 400V – ЗГ, 500W – активне навантаження у колі ЗГ, 500kW Load – активне навантаження у колі СГ, Voltage Regulator – регулювання напруги ЗГ, Diesel Engine & Speed Regulator – дизельний двигун і система регулювання швидкості, Reference Speed(pu) – опорна швидкість у в.о., Reference Voltage(pu) – опорна напруга у в.о., BSM, ВЕхс – шини для вимірювання напруги і струму у колі СГ і ЗГ.

Нелінійне навантаження представлено – трифазним діодним мостом (*Universal Bridge*) з активно-індуктивним навантаженням (*RL load*)  $R_{ld1} = 2 \text{ Ом}$ ;  $L_{ld1} = 0,0116 \text{ Гн}$ , що підключається до мережі через вимикач (*Breaker1*) в час  $t = 1 \text{ с}$ ; та трифазним діодним мостом (*Universal Bridge1*) з активно-ємнісним навантаженням (*RC load*)  $R_{ld2} = 2 \text{ Ом}$ ;  $C_{ld2} = 0,0116 \text{ Ф}$ , що підключається до мережі через вимикач (*Breaker2*) в час  $t = 2 \text{ с}$ .

Трифазний САФ підключається паралельно до мережі в час  $t = 1,5 \text{ с}$ . Через блок трифазного реактору (*Reactor*) підключений трифазний транзисторний перетворювач зібраний по мостовій схемі на IGBT-модулях та знаходиться в підсистемі блоку (*Transistor converter*). До сторони постійного струму блоку транзисторного перетворювача (*Transistor converter*) підключений конденсатор ( $C$ ). Для керування трифазним САФ використовуються два блоки: блок визначення заданого струму САФ (*Current generation block*) та блок формування імпульсів управління ключовими елементами перетворювача (*Pulse shaping block*). Блок

визначення заданого струму САФ (*Current generation block*) реалізує два алгоритми: 1) режим фільтрації на основі  $pq$ -теорії миттєвої потужності – формула (5); 2) режим компенсації-фільтрації на основі  $pq$ -теорії миттєвої потужності – формула (6), обидва алгоритми визначення заданого струму САФ розкриті в роботі [10]. Блок формування імпульсів управління ключовими елементами перетворювача (*Pulse shaping block*) реалізує систему релейного регулювання струму використану в роботі [13]. Параметри моделі САФ розраховані відповідно до [15], з урахуванням особливостей регулювання [16]: індуктивність реактора  $L = 0,0054 \text{ Гн}$ ; конденсатор ємністю  $C = 0,04 \text{ Ф}$ ; напруга конденсатору  $U_C = 4000 \text{ В}$ . Значення зони гістерезису для регулювання похибки струму в методі релейного регулювання струму дорівнює  $HB = 15$ .

Дослідження виконано при розподілі у часі стану комутаційного обладнання наступним чином: спочатку запускається СГ (Synchronous Generator 2MVA 400V), у час  $t = 1 \text{ с}$  включається нелінійне навантаження представлено трифазним діодним мостом (*Universal Bridge1*) з активно-індуктивним навантаженням (*RL load*), у час  $t = 1,5 \text{ с}$  включається трифазний САФ з алгоритмом у режимі фільтрації, у час  $t = 2 \text{ с}$  включається нелінійне навантаження представлено трифазним діодним мостом (*Universal Bridge1*) з активно-ємнісним навантаженням (*RC load*), у час  $t = 2,5 \text{ с}$  включається трифазний САФ з алгоритмом у режимі компенсації-фільтрації. Перемикач з режиму фільтрації у режим компенсації-фільтрації виконується ключем (*Switch1*).

У ході проведеного дослідження отримані осцилограми напруги і струму СГ і навантаження у різні моменти часу і режими роботи автономної системи електропостачання.

На рис. 3 приведена осцилограма напруги  $u_g$  і струму  $i_g$  СГ за весь проміжок розрахунку (3 с).

З загальної осцилограми рис. 3 спостерігається у певні моменти часу регулювання напруги  $u_g$  СГ при зростанні амплітуди струму  $i_g$  СГ. При підключенні САФ і зміні його режиму з фільтрації на компенсацію-фільтрацію спостерігається зростання амплітуди струму  $i_g$ . Для подальшого дослідження вирішено у певні моменти часу деталізувати осцилограму рис. 3 і представити їх у вигляді графіків з спектральним складом.

На рис. 4 наведений графік і спектральний склад напруги  $u_g$  (рис. 4, а) і струму  $i_g$  (рис. 4, б) СГ у режимі холостого ходу (XX).

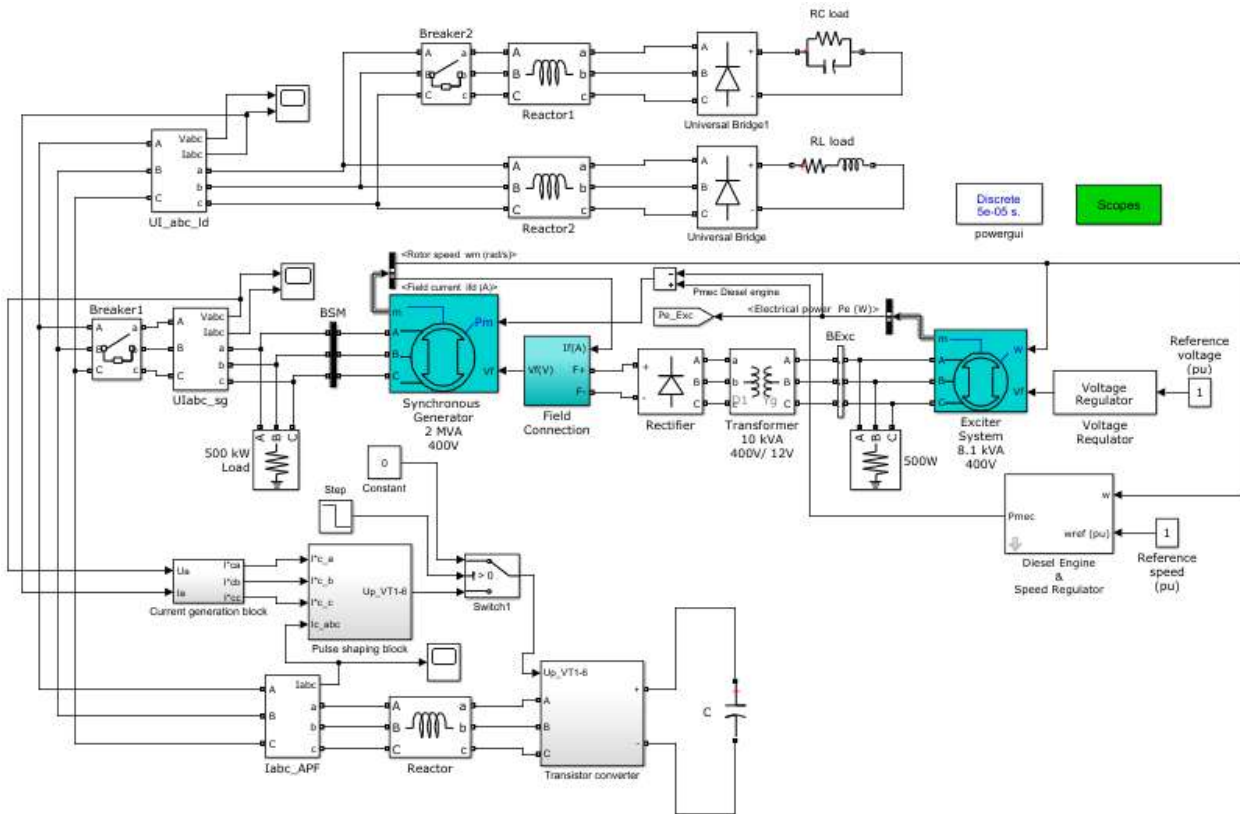


Рисунок 2. Модель схеми вузла системи електроживлення підприємства з САФ

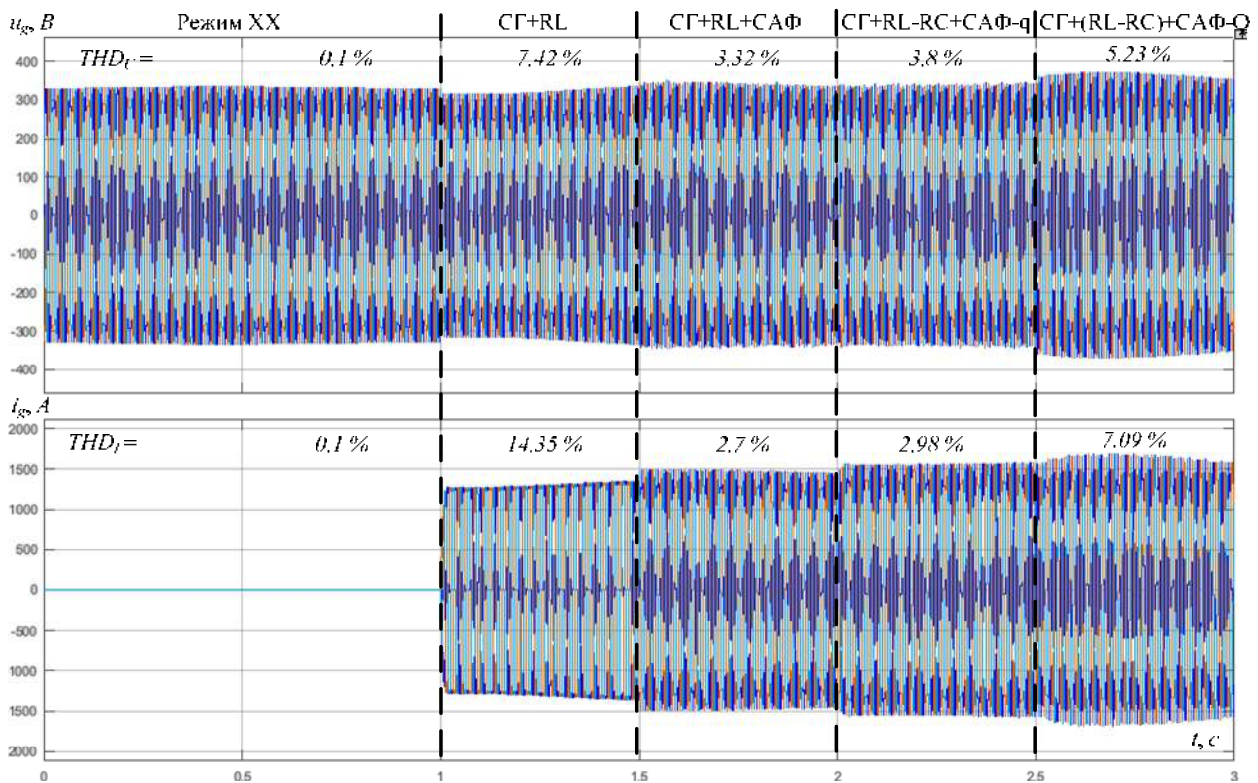


Рисунок 3. Осцилограма напруги  $u_g$  і струму  $i_g$  СГ. Умовні позначення: XX – холостий хід; RL - трифазне нелінійне навантаження актив-но-індуктивного характеру; RC - трифазне нелінійне навантаження актив-но-емнісного характеру; САФ-q – силовий активний фільтр працює у режимі фільтрації; САФ-Q – силовий активний фільтр працює у режимі компенсації-фільтрації

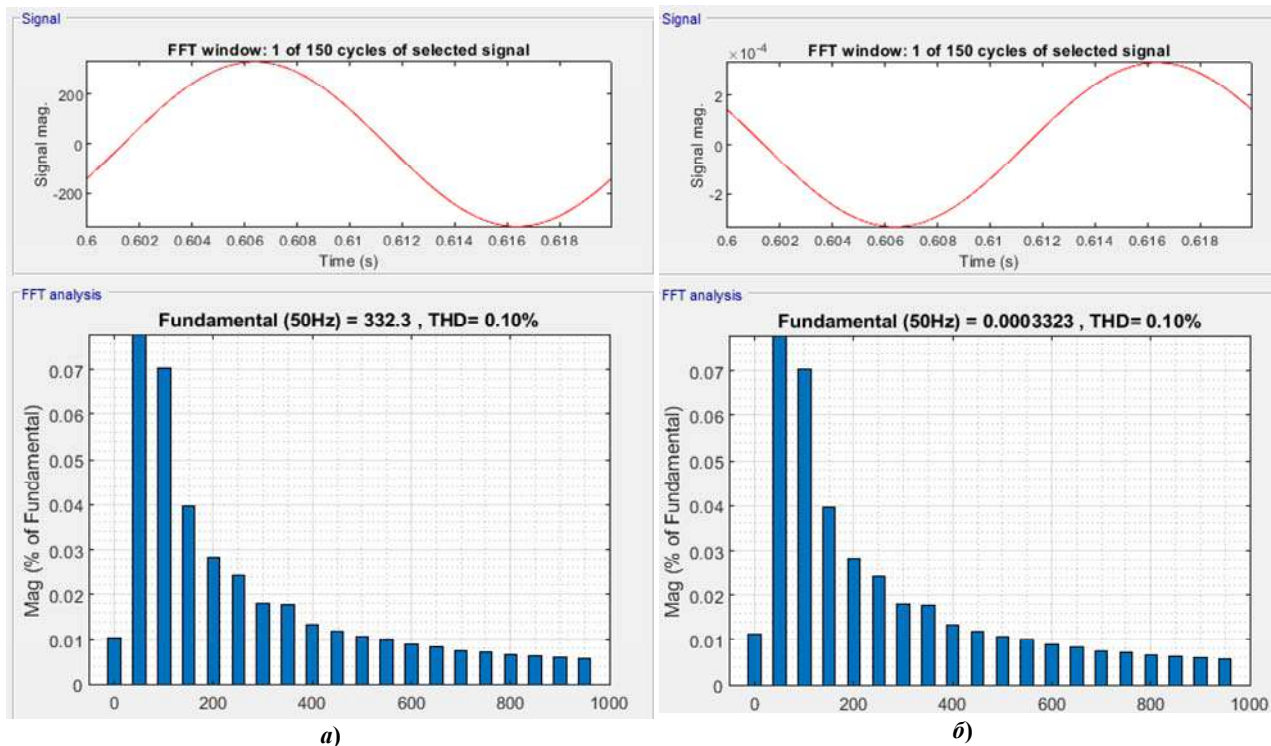


Рисунок 4. Графік і спектральний склад СГ у режимі ХХ: а) напруги  $u_g$  і б) струму  $i_g$

Як бачимо з рис. 4 напруга і струм СГ мають синусоїдальний характер без гармонійних спотворень.

На рис. 5 наведена осцилограма напруги і струму СГ при включенні нелінійного навантаження, що

представлене трифазним діодним мостом (*Universal Bridge1*) з активно-індуктивним навантаженням (*RL load*) у час  $t = 1$  с.

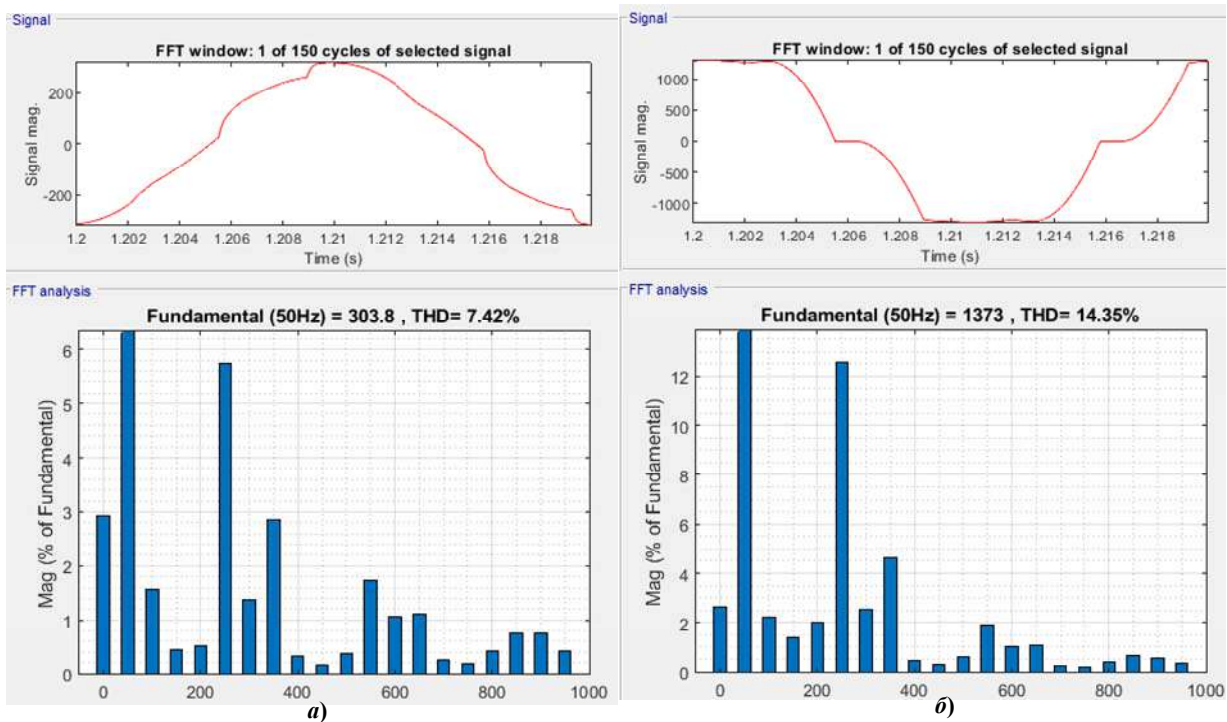


Рисунок 5. Графік і спектральний СГ при активно-індуктивному навантаженні: а) напруги  $u_g$  і б) струму  $i_g$

Як видно, що при роботі СГ на активно-індуктивне навантаження напруга і струм СГ спотворюються вищими гармоніками напруги і струму. Коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги і струму відповідно складає –  $THD_U = 7,42\%$  і  $THD_I = 14,35\%$ .

На рис. 6 наведена осцилограма напруги і струму СГ при включенні САФ, що працює у режимі фільтрації в час  $t = 1,5\text{ с}$ .

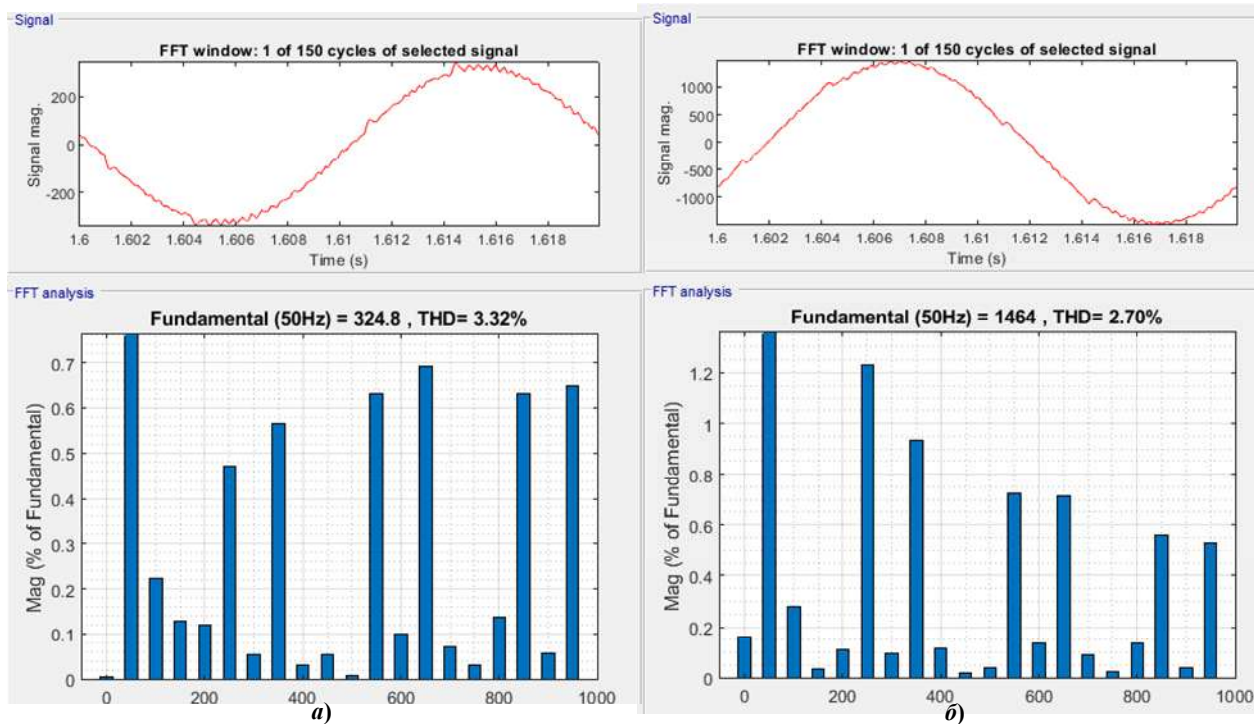


Рисунок 6. Графік і спектральний СГ при роботі САФ у режимі фільтрації: а) напруги  $u_g$  і б) струму  $i_g$

При роботі СГ на активно-індуктивне навантаження з САФ у режимі фільтрації можна відмітити деякі особливості – коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги і струму СГ знизився відповідно на 55,26 %, 81,18 % і складає  $THD_U = 7,42\%$  і  $THD_I = 14,35\%$ .

В час  $t = 2\text{ с}$  включається активно-ємнісне навантаження з паралельною роботою САФ у режимі фільтрації. На рис. 7 приведена графік і спектральний склад струму навантаження (рис. 7, а) і СГ (рис. 7, б).

При активно-ємнісному навантаженні коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої струму навантаження складає  $THD_I = 16,56\%$ , тоді як СГ –  $THD_I = 2,98\%$ . Тобто у ході своєї роботи САФ знижує рівень вищих гармонік струму на 82 %.

У час  $t = 2,5\text{ с}$  включається у роботу САФ у режимі компенсації-фільтрації. На рис. 8 приведена графік і спектральний склад струму навантаження (рис. 8, а) і СГ (рис. 8, б).

При цьому режимі роботі САФ знижує коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої струму СГ у порівнянні до навантаження на 57,18 %. Коефіцієнт СГ складає  $THD_I = 7,09\%$ . Це гірші показники при роботі САФ у режимі фільтрації, чим у режимі компенсації-фільтрації.

Також додатково оцінені енергетичні показники такі як: активна потужність СГ і навантаження та реактивна потужність СГ і навантаження. Дані занесені до табл. 1. Умовні позначення по аналогії з рис. 3.

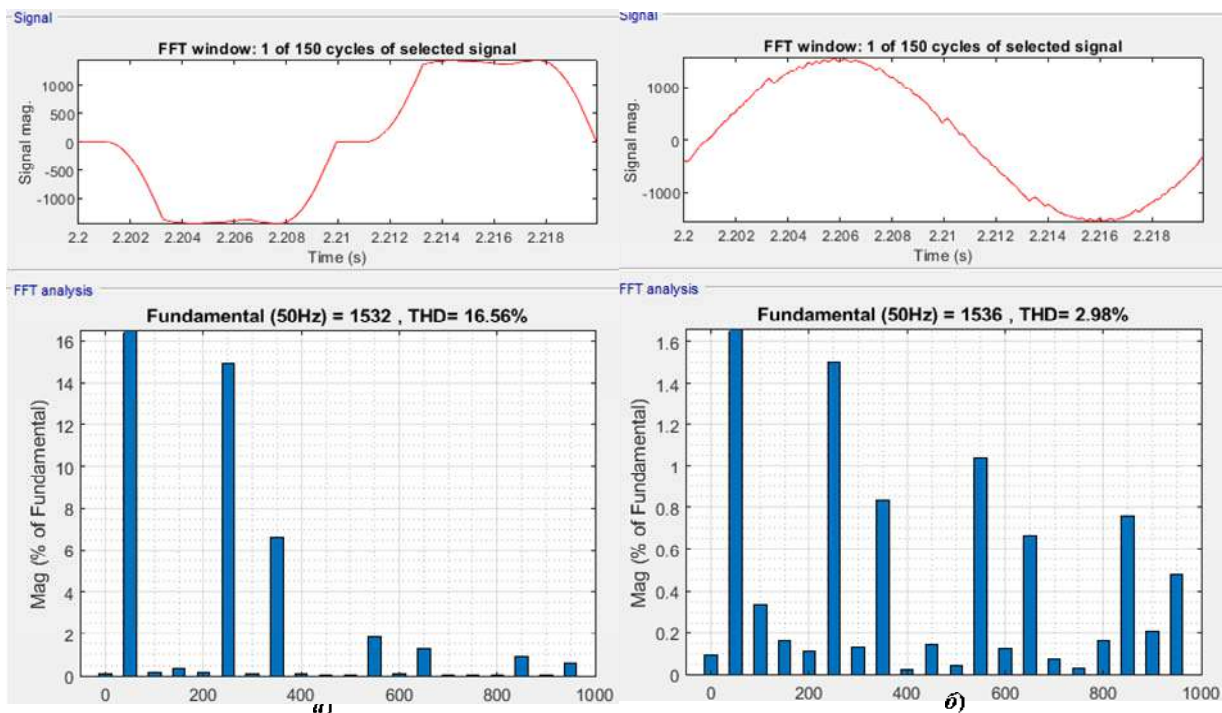


Рисунок 7. Графік і спектральний склад струму: а) навантаження і б) СГ

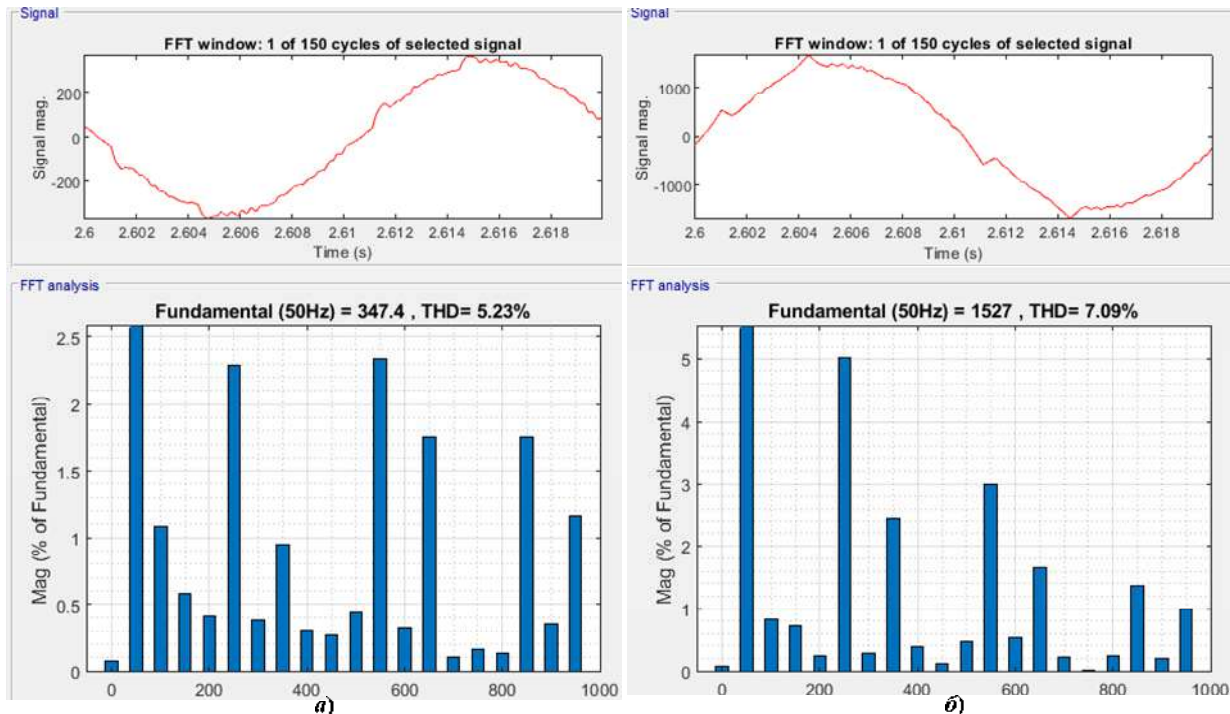


Рисунок 8. Графік і спектральний склад СГ: а) напруги і б) струму при роботі САФ у режимі компенсації-фільтрації

**Таблиця 1.** Показники потужності автономної системи електропостачання з паралельним підключенням САФ

При $t = 1,4$ с СГ+RL				
фаза	$P_{ld}, \text{Вт}$	$Q_{ld}, \text{ВАр}$	$P_g, \text{Вт}$	$Q_g, \text{ВАр}$
A	211600	-98800	-211600	98800
B	206300	-97990	-206300	97990
C	207900	-97590	-207900	97590
При $t = 1,8$ с СГ+RL+САФ-г				
фаза	$P_{ld}, \text{Вт}$	$Q_{ld}, \text{ВАр}$	$P_g, \text{Вт}$	$Q_g, \text{ВАр}$
A	207900	-103200	-208800	103500
B	205400	-103400	-210200	103200
C	208900	-103500	-210200	103500
При $t = 2,4$ с СГ+RL-RC+САФ-г				
фаза	$P_{ld}, \text{Вт}$	$Q_{ld}, \text{ВАр}$	$P_g, \text{Вт}$	$Q_g, \text{ВАр}$
A	220200	-109300	-221500	108000
B	220700	-109000	-221800	108000
C	221200	-109200	-221200	108000
При $t = 2,8$ с СГ+RL-RC+САФ-Q				
фаза	$P_{ld}, \text{Вт}$	$Q_{ld}, \text{ВАр}$	$P_g, \text{Вт}$	$Q_g, \text{ВАр}$
A	256300	-128000	-261500	-11370
B	256100	-127900	-259000	-11140
C	252400	-128700	-267500	-11030

Слід відмітити, що у перших варіантах експерименту дотримується баланс активної і реактивної потужності між: СГ – нелінійне навантаження, СГ – нелінійне навантаження – силовий активний фільтр. Але слід відмітити, що САФ працює у режимі фільтрації вищих гармонік струму. У четвертому варіанті експерименту порушується баланс активної і реактивної потужності при її перетіканні між СГ – нелінійне навантаження – силовий активний фільтр. Це пов'язано з тим, що САФ (у режимі компенсації-фільтрації) і СГ одночасно впливають на основну гармоніку складової реактивної потужності (визначається методом інтегрування).

## V. ВИСНОВКИ

При роботі СГ з регулюванням напруги збудження на нелінійне навантаження погіршуються показники якості електроенергії, зокрема спотворюється синусоїдальність напруги ( $THD_U = 7,42$  %) і доцільним є застосування САФ, що покращує показники напруги і струму СГ на 55,26 %, 81,18 %.

Так як з автоматичним регулюванням напруги збудження СГ виконується відповідне регулювання реактивної потужності по основній гармоніці, тому більш ефективним є застосування САФ тільки у режимі фільтрації вищих гармонік струму. Це покращує його роботу і при цьому знижується  $THD_U$  на 25,74 %, а  $THD_I$  на 24 %.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

[1] Чередник, Н.Г. Дослідження режиму синхронного генератора когенераційної установки при паралельній та автономній роботі з урахуванням явища насичення магнітної системи генератора / Н.Г. Чередник, О.В. Бялобржеський // Електротехніка та електроенергетика. – Запоріжжя: Національний університет "Запорізька політехніка", 2016. – № 1. – С. 49–56.

[2] Бялобржеський, О.В. Автоматизовані системи керування в електроенергетиці: навчальний посібник. / О.В. Бялобржеський, Н.Г. Чередник. – Кременчук, ПП Щербатих О. В., 2016. – 204 с.

[3] Бересин, О.О. Особливості побудови випробувальної станції синхронних генераторів, що працюють зі змінною частотою обертання / О.О. Бересин, А.О. Бойко, С.М. Радімов // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – Одеса: Одеський національний політехнічний університет, 2012. – № 7. – С. 42-46.

[4] Котеленец, Н.Ф. Способ и устройство синхронизации возбужденного синхронного генератора с сетью / Н.Ф. Котеленец, А.В. Богачев, Е.В. Ежов // Электричество. – 2014. – №4. – С. 50-54.

[5] Фролов, М.Ю., Фишов А.Г. "Идентификация электрических параметров синхронного генератора при включении в распределительную сеть" / Фролов, М.Ю., Фишов А.Г. / Проблемы региональной энергетики, no. 1 (33), 2017, pp. 32-39.

[6] Vlasenko R. Analysis of Three-Phase Parallel Active Power Filter Operation Mode With Arc Furnace Active Power's Fluctuations / R. Vlasenko, O. Bialobrzheskyi, A. Gladyr // 2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems. Conference proceedings. September. – 2018. – pp. 80-84. DOI: 10.1109/IEPS.2018.8559547.

[7] <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/examples/mechanical-coupling-of-synchronous-generator-with-exciter-system.html#d117e20163.htm>

[8] Вайнштейн, Р.А. Математические модели элементов электроэнергетических систем в расчетах установившихся и переходных процессов: учебное пособие / Р.А. Вайнштейн. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 114 с.

[9] Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink / И.В. Черных – СПб. : Питер, 2008. – 288 с.

[10] Akagi, H., Watanabe, E. H., Aredes, M. Instantaneous Power Theory And Applications To Power Conditioning, Wile-IEEE Press., 2007. – 379 p. ISBN 978-0-470-10761-4.

- [11] Tugay, D. Three theorems of the instantaneous power theory. /Tugay, D., Zhemerov, G., Korneliuk, S., & Kotelevets, S. // 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering, UKRCON 2019 - Proceedings, 289-294. doi:10.1109/UKRCON.2019.887990
- [12] Агунов, А. В. Управление качеством электроэнергии при несинусоидальных режимах / А. В. Агунов - СПб. : СПбГМТУ, 2009. – 134 с.
- [13] Власенко, Р.В. Порівняння методів компенсації неактивної потужності трифазним силовим активним фільтром з адаптивним релейним регулятором струму / Р.В. Власенко, О.В. Бялобржеський // Електротехніка та електроенергетика. – Запоріжжя: Національний університет "Запорізька політехніка", 2014. – № 2. – С. 20-27. DOI: 10.15588/1607-6761-2014.
- [14] Zagirnyak, M. Analysis of operation of power components compensation systems at harmonic distortions of mains supply voltage /Zagirnyak, M. Maliakova, M. Kalinov, A. // Paper presented at the Joint International Conference - ACEMP 2015: Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics, OPTIM 2015: Optimization of Electrical and Electronic Equipment and ELECTROMOTION 2015: International Symposium on Advanced Electromechanical Motion Systems, 2016 - pp. 355-362. DOI:10.1109/OPTIM.2015.7426958
- [15] Власенко, Р.В. Вплив потужності спотворення на параметри елементів силової частини трифазного силового активного фільтра / Р.В. Власенко, О.В. Бялобржеський // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. Кременчук: Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, 2019. – № 1. – С. 14-19. DOI: 10.30929/1995-0519.2019.1.14-19.
- [16] Burlaka, V. V. Residential uninterruptible power supply system with renewable energy sources and battery pack. / Burlaka, V. V., Podnebennaya, S. K., & Gulakov, S. V. // Paper presented at the 2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems, IEPS 2018 - Proceedings, 2018 – pp. 125-128. doi:10.1109/IEPS.2018.8559498

Стаття надійшла до редакції 18.05.2020

## ВЛИЯНИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ НАГРУЗКИ НА АВТОНОМНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЕ СИЛОВОГО АКТИВНОГО ФИЛЬТРА

**ВЛАСЕНКО Р.В.** ассистент, ассистент кафедры систем электропотребления и энергетического менеджмента Кременчугского национального университета имени Михаила Остроградского, Кременчуг, Украина, e-mail: ruslan.vlasenko@i.ua;

**БЯЛОБРЖЕСКИЙ А.В.** к-т техн. наук, доцент, доцент кафедры систем электропотребления и энергетического менеджмента Кременчугского национального университета имени Михаила Остроградского, Кременчуг, Украина, e-mail: seemal@kdu.edu.ua;

**Цель работы.** Целью статьи исследование режимов работы трехфазного силового активного фильтра в составе автономной электрической сети при подключении к сети трехфазной нелинейной нагрузки различного спектрального характера.

**Методы исследования.** Для проведения исследований использовались положения рq-теории мощности, теория электрических цепей, теория автоматического управления, математическое моделирование в пакете Matlab.

**Полученные результаты.** Получено графики и спектральный состав напряжения сети, тока нагрузки, что позволяет оценить эффективность применения силового активного фильтра в режиме фильтрации в составе автономной электрической сети, которая представляет собой синхронный генератор.

**Научная новизна.** Доказана эффективность параллельной работы силового активного фильтра в режиме фильтрации с синхронным генератором при резкопеременной нелинейной нагрузке.

**Практическая ценность.** Использование предложенной методики позволит создать трехфазный силовой активный фильтр для применения его в автономных электрических сетях, представленных синхронным генератором с автоматическим регулированием напряжения возбуждения.

**Ключевые слова:** силовой активный фильтр, рq-теория мощности, синхронный генератор, качество электрической энергии, нелинейная нагрузка.



## THE INFLUENCE OF NONLINEAR LOAD ON THE AUTONOMOUS ELECTRICAL NETWORK AT PARALLEL WORK OF THE ACTIVE POWER FILTER

VLASENKO R.V. Assistant department of the Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenchuk, Ukraine, e-mail: ruslan.vlasenko@i.ua;  
BIALOBRZHESKYI O.V. Ph.D, Associate professor, Associate professor of the technical science department of the Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenchuk, Ukraine, e-mail: seemal@kdu.edu.ua;

**Purpose.** The purpose of the article is to investigate the modes of operation of a three-phase active power filter in the composition of an autonomous electrical network when connected to a network of three-phase nonlinear load of different spectral character.

**Methodology.** For the research, the provisions of the *pq*-theory of power, the theory of electrical circuits, the theory of automatic control, mathematical modeling in the Matlab package were used.

**Findings.** The graphs and spectral composition of the mains voltage and load current have been obtained, which makes it possible to evaluate the effectiveness of using a power active filter in the filtration mode as part of an autonomous electrical network, which is a synchronous generator.

**Originality.** The efficiency of the parallel operation of a power active filter in the filtration mode with a synchronous generator at an abruptly variable nonlinear load is proved.

**Practical value.** The use of the proposed technique will make it possible to create a three-phase power active filter for its use in autonomous electrical networks, represented by a synchronous generator with automatic regulation of the excitation voltage.

**Keywords:** active power filter, *pq*-theory power, synchronous generator, electrical energy quality, non-linear load.

### REFERENCES

- [1] Cherednyk, N.G., Bialobrzheski, O.V. (2016). Doslidgen'ya regymu synhron'ogo generator kogeneratchiynoyi ustanovky pry paralelniy ta avtonomniy roboti z urahuvan'yam yavyscha nasychen'ya magnitnoyi systemy generatora [The study of the mode of synchronous generator cogeneration unit in parallel and autonomous work considering the phenomenon of magnetic saturation of generator system]. *Electrical Engineering and Power Engineering*, 1, 49-56.
- [2] Bialobrzheski, O.V., Cherednyk, N.G. (2016). Avtomatyzovani systemy keruvan'ya v elektroenergetychi [Automated control systems in power engineering]. Kremenchuk, *PP Scherbatyh O.V.*, 204.
- [3] Beresyn, O.O., Boyko, A.O., Radimov, S.M. (2012). Osoblyvosti pobudovy viprobuval'noyi stantchiyi synhron'yh generatoriv, scho pratchyu't' zi zmin'oyu chastoty obertan'ya [Features of construction of the proof-of-compliance test station for variable speed synchronous generators]. *Electrotechnic and computer systems*, 7(83), 42-46.
- [4] Kotelenets, N.F., Bogachev, A.V., Ezhov, E.V. (2014). The method and apparatus of synchronization excited synchronous generator with the network, *Elektrichestvo*, no. 4, pp. 50– 54.
- [5] Frolov, M.Yu., and Fishov, A.G. (2017). Identifikatsiya elektricheskikh parametrov sinkhronnogo generat-tora pri vklyuchenii v raspre-delitel'nyuy set' [Identification of electrical parameters of a synchronous generator when connected to the distribution network] *Problems of the regional energetics*, no. 1 (33), pp. 32-39.
- [6] Vlasenko, R., Bialobrzheskiy, O., and Gladyr, A. (2018). Analysis of three-phase parallel active power filter operation mode with arc furnace active power's fluctuations, 2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS), Kharkiv, pp. 80-84, doi: 10.1109/IEPS.2018.8559547.
- [7] <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/examples/mechanical-coupling-of-synchronous-generator-with-exciter-system.html#d117e20163.htm>
- [8] Vaynshteyn, R.A. (2010). Matematicheskie modeli elementov elektroenergeticheskikh sistem v raschetah ustanovivshih-sya i perehodnykh protsessov [Mathematical models of electric power systems elements in the calculation of steady-state and transient], Tomsk, Russia, 114 p.
- [9] Chernyih, I.V. (2008). Modelirovanie elektrotehnicheskikh ustroystv v MATLAB, SimPowerSystems i Simulink [Simulation of electrical devices in MATLAB, SimPowerSystems and Simulink], SPbSMTU, Sankt-Peterburg, Russia, 288p.
- [10] Akagi, H., Watanabe, E. H., Aredes, M. Instantaneous Power Theory And Applications To Power Conditioning, Wile-IEEE Press., 2007. – 379 p. ISBN 978-0-470-10761-4.
- [11] Tugay, D., Zhemerov, G., Korneliuk, S., &

- Kotelevets, S. (2019). Three theorems of the instantaneous power theory. Paper presented at the 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering, UKRCON 2019 - Proceedings, 289-294. doi:10.1109/UKRCON.2019.887990
- [12] Agunov, A. V. (2009). Upravlenie kachestvom elektroenergiyi pri nesinusoidal'nyh rezhymah [Power quality management with non-sinusoidal modes], SPbSMTU, Sankt-Peterburg, Russia, 134p.
- [13] Vlasenko, R.V., Bialobrzheski, O.V. (2014). Porivnyan'ya metodiv kompensatchiyi neaktyvnoyi potugnosti tryfaznym sylovym aktyvnym fil'trom z adaptivnym releynym regulyatorom strumu [Adaptive control of current controller relay for three-phase active power filter]. *Electrical Engineering and Power Engineering*, 2, 20-27.
- [14] Zagirnyak, M., Maliakova, M., and Kalinov, A. (2016). Analysis of operation of power components compensation systems at harmonic distortions of mains supply voltage, Paper presented at the Joint International Conference - ACEMP 2015: Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics, OPTIM 2015: Optimization of Electrical and Electronic Equipment and ELECTROMOTION 2015: International Symposium on Advanced Electromechanical Motion Systems, pp. 355-362. DOI:10.1109/OPTIM.2015.7426958
- [15] Vlasenko, R.V., Bialobrzheski, O.V. (2019). Vplyv potugnosti spotvoren'ya na parametry elementiv sylovoyi chastyny tryfaznogo sylovogo aktyvnogo fil'tra [The influence of the distortion power on the parameters of the power components of a three-phase active power filter]. *Scientific journal "Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University"*, 1(114), 14-19.
- [16] Burlaka, V. V., Podnebennaya, S. K., and Gulakov, S. V. (2018). Residential uninterruptible power supply system with renewable energy sources and battery pack. Paper presented at the 2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems, IEPS 2018 - Proceedings, pp. 125-128. doi:10.1109/IEPS.2018.8559498