

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ "ЗАПОРІЗЬКА ПОЛІТЕХНІКА"

---



*Науковий журнал*

# ЕЛЕКТРОТЕХНІКА та ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА

№2'2023

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

*Виходить 4 рази на рік*

Запоріжжя

2023

Головний редактор д-р техн. наук  
Яримбаш Д.С.  
Заст. гол. редактора д-р техн. наук  
Тиховод 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.,  
наказ МОНУ № 1471 від 26.11.2020 р.)*

ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ (Україна)

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

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

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

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

Видавець: Національний університет "Запорізька політехніка", м. Запоріжжя. Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК №6952 від 22.10.2019р.  
Реєстрація журналу: Журнал зареєстровано у Міністерстві юстиції України. Свідоцтво про державну реєстрацію КВ №24219-14059 ПР від 07.11.2019р.  
Адреса редакції: Редакційно-видавничий відділ. національний університет "Запорізька політехніка", вул. Жуковського, 64, м. Запоріжжя, 69063, Україна. Телефон:+380(61)769-82-96 Факс: (061) 764-21-41 e-mail: rvv@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 14.09.2023 за рекомендацією вченої ради національного університету "Запорізька політехніка" (протокол №2 від 25.09.2023 р.). Формат 60x84/8. Ум. Др. Арк. 6,86. Тираж 300 прим. Зам. №683.

ZAPORIZHZHIA POLYTECHNIC NATIONAL UNIVERSITY

---



*Scientific journal*

# **ELECTRICAL ENGINEERING & POWER ENGINEERING**

**№2'2023**

*Founded by Zaporizhzhia Polytechnic National University in May 1999*

*4 issues per year*

Zaporizhzhia

2023

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

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

FOREIGN MEMBERS OF EDITORIAL BOARD

**Yunus Biçen**, Ph.D. Duzce University, Turkey;  
**Prof. Jerzy Zgraja**, Ph.D., Lodz University of Technology, Lodz, Poland;  
**Prof. Oszkár Bíró**, Ph.D., Technical University of Graz, Graz, Austria;  
**Zurek, Stan**, Ph.D., Research Associate, Cardiff University, Cardiff, United Kingdom;  
**Sebastian Tomy**, Ph.D, Toronto University, Canada, (Technical Expert, Motor Drives and Control Group, Bay City, Michigan, USA);  
**Arturi Cesare Mario**, PhD., Prof., Polytechnic University of Milan, Italy;  
**Carlos Roncero-Clemente**, Ph.D., Prof., Universidad de Extremadura, Badajoz, Spain;  
**José Roberto Camacho PhD**, Prof., Universidade Federal de 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**, Sc.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; **O.S. Nazarova**, Ph.D., assoc. prof., Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine; **Yu.S. Bezverkhnia**, Ph.D., Senior Lecturer, Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine.

*The journal included in the international scientometric databases, catalogs and search systems: Index Copernicus; CrossRef; Directory of Open Access Journals (DOAJ); Google Academy; OpenAIRE; Public Knowledge Project (PKP); ResearchBib - Academic Resource Index; Scientific Indexing Services (SIS); Ulrich's Periodicals Directory; WorldCat; 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 Sc.D. and a Ph.D. of technical sciences in the field of electrical engineering and electrical engineering in accordance with the headings: 1. Electrical engineering; 2. Power engineering; 3. Automation and computer integrated technologies.

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

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

Journal was registered: by the Ministry of Justice of Ukraine. Registration number KV № 24219-14059 PR dated November 7, 2019.

Address of editor and editorial office: Zaporizhzhia Polytechnic National University, st. Zhukovsky, 64, Zaporozhia, 69063, Ukraine. Phone: +380(61)769-82-96 Fax: (061) 764-21-41 e-mail: rvv@zntu.edu.ua.

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

Computer layout Dyachenko O.O. Editor of English texts Voitenko S.V. The journal was signed on September 09, 2023 on the recommendation of the academic council of the Zaporizhzhia Polytechnic National University (Protocol No.2 dated September 25, 2023). Sheet size 60x84/8. Cond. Print. Sheets 6,86. Number of copies printed 300. Rep. № 683.

# ЗМІСТ

## I ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

***Верещаго Є.М., Костюченко В.І.***

Підвищення якості стабілізації вихідного струму імпульсного перетворювача постійного струму, що працює на плазмову дугу.....7

***Бородай В.А., Нестерова О.Ю., Боровик Р.О., Федоров С.І.***

Моделювання автономних інверторів напруги джерел живлення однофазних асинхронних приводів .....17

***Тиховод С.М., Дівчук Т.Є., Солодовнікова Т.П., Ситік О.В.***

Спектральний метод прискореного моделювання електричних кіл що містять тиристори...27

## II ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА

***Коваленко М.А., Чумак В.В., Коваленко І.Я., Ткачук І.В., Харфорд А.Г.***

Оцінка параметрів магнітного редуктора для автономної вітроустановки при зміні швидкості вітру.....32

***Шутенко О.В., Кулик О.С.***

Аналітичний метод розпізнавання типу дефекту маслonaповненого обладнання за результатами аналізу розчинених у маслі газів.....43

# CONTENTS

## I ELECTRICAL ENGINEERING

*Vereshchago E.M., Kostiuchenko V.I.*

Improving the quality of the stabilization of the output current of the pulse dc converter operating on a plasma ARC.....7

*Borodai V.A., Nesterova O.Yu., Borovyk R.O., Fedorov S.I.*

Simulation of autonomous voltage inverters of power sources of single-phase asynchronous drives.....17

*Tykhovod S.M., Dyvchuk T.Ye., Solodovnikova T.P., Sytik O.V.*

Spectral method of electrical circuits accelerated simulation with thyristors.....27

## II POWER ENGINEERING

*Kovalenko M.A., Chumack V.V., Kovalenko I.Y., Tkachuk I.V., Harford A.G.*

Evaluation of magnetic gear parameters for autonomous wind installation with changing wind speed.....32

*Shutenko O.V., Kulyk O.S.*

Analytical method of identifying the type of defect of oil-filled equipment according to the results of analysis of gases dissolved in oil.....43

УДК 621.314.26

## ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ СТАБІЛІЗАЦІЇ ВИХІДНОГО СТРУМУ ІМПУЛЬСНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ, ЩО ПРАЦЮЄ НА ПЛАЗМОВУ ДУГУ

**ВЕРЕЩАГО Є.М.** канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри морського приладобудування Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв, Україна, e-mail: venmkua@gmail.com;

**КОСТЮЧЕНКО В.І.** канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри суднових електроенергетичних систем Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв, Україна, e-mail: vitalii.kostiuchenko@nuos.edu.ua;

**Мета роботи.** Підвищення показників якості процесів керування імпульсними перетворювачами постійного струму, які працюють на дугове навантаження, на основі побудови процедур синтезу робастних систем.

**Методи дослідження.** Розглянуто спосіб підвищення якості стабілізації вихідного струму імпульсного перетворювача постійного струму, що базується на поєднанні керування по збурюючому впливу з керуванням по відхиленню вихідного струму від заданого значення (метод локалізації).

**Отримані результати.** В статті розглянуто розв'язання задач оптимізації системи стабілізації вихідного струму імпульсного перетворювача постійного струму, що живить плазмову дугу при, в тому числі, стохастичних зовнішніх впливах зі зв'язком з проблемами негрубості та суворой реалізованості оптимальних регуляторів і вирішення задач оптимізації за якістю інваріантності. Розглядаються методи побудови оптимальних регуляторів та встановлюється можливість розв'язання задачі оптимізації за якістю інваріантності. Наводяться приклади вирішення детермінованих та стохастичних завдань оптимізації з урахуванням властивостей грубості, структурної та суворой реалізованості стабілізуючого регулятора.

Забезпечено кращу точність стабілізації струму дуги в статичній та динамічній, що підтверджується імітаційним моделюванням. Якість стабілізації струму дуги досягається під час використання систем керування за якістю інваріантності та розв'язання задач оптимізації в класі «хороших» регуляторів, побудованих на основі методу локалізації. Регулятори, розраховані на основі співвідношень методу локалізації, забезпечують необхідну якість процесів і мають властивість грубості (робастності) по відношенню до відхилення параметрів об'єкта від номіналів у широкому діапазоні. Якщо об'єкт містить нестационарні параметри або його властивості не повністю відомі, краще використовувати для розрахунку регулятора метод локалізації.

**Наукова новизна.** Отримали подальший розвиток процедури синтезу оптимальних регуляторів та методи вирішення задач оптимізації за властивістю інваріантності.

**Практична цінність.** На основі методу комбінованого керування та концепцій локалізації синтезовано оптимальні закони керування вільним та вимушеними рухами одновимірної системи. Остання при цьому має властивість грубості. Ефективність синтезованих алгоритмів ілюструється результатами математичного моделювання.

**Ключові слова:** якість стабілізації; імпульсний перетворювач постійного струму; плазмова дуга; комбіноване керування.

### I. ВСТУП

У системах стабілізації струму дуги широко застосовуються регулятори низького порядку пропорційно-інтегрального (ПІ), пропорційно-диференціального (ПД) та пропорційно-інтегрально-диференціального (ПІД) типу [1]-[4]. Їхній параметричний синтез проводиться аналітично [5], [6].

Широке застосування типових ПІД-регуляторів [7]-[9] має певні недоліки: необхідність налаштування їх параметрів; високий рівень витрат енергії; чутливість до впливу параметричних шумів та ін. Важливо підкреслити, що навіть при найкращому налаштуванні регулятори дозволяють лише приблизно забезпечити необхідну якість перехідного процесу, якщо параметри об'єкта змінюються, і на нього впливають неві-

домі зовнішні збурення.

Основним і найбільш небезпечним впливом для пристрою електроживлення повітряного плазмотрона є напруга навантаження – адитивне збурення. Справді, сам собою дуговий проміжок є нестационарним навантаженням. До того ж для повітряних плазмотронів характерні періодичні пробої, що викликають різке зменшення напруги на плазмотроні (ефект шунтування). Стрибокподібні провали напруги при шунтуванні можуть досягати 20-30% [10]. Сплески струму, викликані пробоями в плазмотроні перевищують більш ніж на порядок значення пульсацій вихідного струму в стаціонарних режимах, а тривалість перехідних процесів не перевищує 1 мс [10].

Стабілізація вихідного струму, заснована на ке-

руванні лише за відхиленням від заданого значення, для традиційних регуляторів не дає бажаної якості [7], [11]-[14]. Тому компенсувати основну складову відхилення, що викликана зміною напруги навантаження, можна реалізуючи керування за впливом, що збудує, що представляє собою відхилення напруги  $U_0$  від номінального значення  $U_{0n}$ :  $\tilde{u}_0 = U_0 - U_{0n}$ . І тому досить змінювати величину  $\tilde{d}$  залежно від  $\tilde{u}_0$ . Іншими словами, при  $\tilde{u}_0 > 0$  час накопичення ( $t_i$ ) електромагнітної енергії в дроселі  $L$  слід зменшувати, а при  $\tilde{u}_0 < 0$  – збільшувати. При цьому керуючий вплив до перетворювача прикладається безпосередньо в момент появи збудуючого впливу. Це дозволяє забезпечити найкращі динамічні властивості перетворювача.

Загальновідома важливість завдань забезпечення інваріантності заданого виходу системи керування по відношенню до зміни деяких збудуючих впливів (див. [11], [13] та ін.). Добре також відомо, що прагнення досягти такої інваріантності часто суперечить вимогам забезпечення стійкості та грубості системи [15].

## II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Ефективним методом вирішення завдання регулювання об'єкта є добре відомий метод логарифмічних частотних характеристик [5], [6].

Найбільш сучасні підходи – методи аналітичного синтезу регуляторів: метод, що ґрунтується на теорії модального керування, та метод, який використовує процедуру аналітичного конструювання регуляторів [14], [15]. Ці методи спираються на рівняння якості [15].

У той самий час у разі, коли параметри об'єкта змінюються у часі невідомим чином проблема вибору належного зворотного зв'язку значно ускладнюється. Завдання ефективного керування нестационарними об'єктами при неконтрольованих параметричних збуреннях і в даний час становить значний теоретичний та практичний інтерес. Особливий інтерес становлять рішення, засновані на використанні безперервних керування та при кінцевих коефіцієнтах передачі в контурі координатного зворотного зв'язку. Одним із можливих у цьому напрямі підходів є використання методу локалізації [7]-[9]. Застосування його для парірування параметричних і координатних збурень у системі і присвячено подальший виклад.

Звичайно виникає проблема вибору регуляторів, для яких неінваріантність заданого виходу системи щодо заданого входу була б мінімальною. Виклад теорії та відомості з історії питання можна знайти, наприклад, у [11], [13].

## III. МЕТА РОБОТИ

Мета цієї статті – дати уявлення про підвищення якості стабілізації вихідного струму перетворювача, що базується на поєднанні керування за збудуючим

впливом, що виконує основну функцію, з керуванням по відхиленню вихідного струму від заданого значення і привести типові результати, які найбільш просто формулюються.

Об'єктом дослідження є статичні та динамічні процеси стабілізації імпульсних стабілізаторів струму дуги в умовах неповної інформативності моделей та зовнішніх збурень.

Предметом дослідження є процедури синтезу оптимальних регуляторів та методи вирішення задач оптимізації за властивістю інваріантності.

Мета роботи – підвищення якості стабілізації вихідного струму імпульсного перетворювача постійного струму, що працює на дугове навантаження, з урахуванням дії неконтрольованих зовнішніх збурень та зміни параметрів немінімально-фазового об'єкта керування в широкому діапазоні.

Розглянемо імпульсний перетворювач постійного струму, що працює на дугове навантаження, – систему керування зі скалярним входом ( $f$ ) та виходом ( $y$ ), блок-схема якої умовно зображена на рис. 1. Ця система містить регулятор (з входом  $u$  і виходом  $u$ ) з передаточною функцією  $W^r(s)$ , що підлягає визначенню. Регулятор слід вибрати так, щоб

$$J[W^r(\cdot)] \rightarrow \inf,$$

де  $J$  – деяке число, що характеризує кількість роботи системи керування, і за властивістю інваріантності  $R_{y/f} \rightarrow \inf$ , де  $J = R_{y/f}$  – міра неінваріантності.

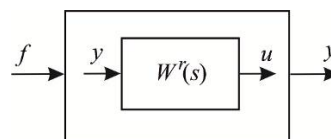


Рисунок 1. Блок-схема системи «об'єкт та регулятор»

## IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГУ МАТЕРІАЛУ І АНАЛІЗ ОТРИМАННИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Модель перетворювача. Згідно з отриманим у роботі [16] результатом, модель імпульсного перетворювача постійного струму, що працює на дугове навантаження, при природних спрощуючих припущеннях, описується наступним лінеаризованим рівнянням збуденого руху

$$L \frac{d\tilde{i}_L}{dt} + r_L \tilde{i}_L - R_{diff0} \tilde{i}_L = nD\tilde{u}_{in} + nU_{in}\tilde{d} - \tilde{u}_0. \quad (1)$$

Тут  $i_L$  – струм дроселя (дуги) – вихід об'єкта,  $u_0$  – напруга навантаження (зовнішній вплив). Знак «~» показує нескінченно малу зміну функції або змінної щодо значення періодичного режиму.

Переходячи до зображень по Лапласу в рівнянні (1) при початковому нульовому значенні, отримуємо

$$(Ls + r_L - R_{diff0})\tilde{I}_L(s) = nD\tilde{U}_{in}(s) + nU_{in}d(s) - \tilde{U}_0(s). \quad (2)$$



Якщо формувати коефіцієнт заповнення в періодичному режимі  $D$  обернено пропорційно до вхідної напруги  $U_{in}$  коефіцієнт посилення широтно-імпульсного регулятора по постійній складовій залишається постійним при зміні  $U_{in}$ . Це практично усуває вплив зміни  $U_{in}$  на вихідну напругу перетворювача. Тоді для визначення передаточних функцій моделі перетворювача покладемо в (2)  $\tilde{U}_{in}(s) = 0$ .

Віднісши коефіцієнти передачі  $k_i, R_{CS}$  (має розмірність опору),  $k_{PWM}, nU_{in}$  до незмінної частини системи, отримуємо передаточні функції моделі перетворювача по керуючому

$$W_0(s) = k_0 / (\tau s - 1),$$

де  $k_0 = k_i \cdot \frac{R_{CS}}{R_{diff0} - r_\Sigma} \cdot k_{PWM} \cdot nU_{in}$ ;  $k_{PWM} \approx T / U_m$ ;

$\tau = L / (R_{diff0} - r_\Sigma)$  – постійна часу ланцюга дроселя;  $i$  по збурюючому

$$W_{i_L/u_0}(s) = -(1/(R_{diff0} - r_\Sigma))(1/(\tau s - 1))$$

впливам відповідно.

Оцінимо коефіцієнт посилення перетворювача при  $k_i R_{CS} = 82 \cdot 75 \cdot 10^{-5}$  Ом;  $r_\Sigma = 0,01$  Ом;  $nU_{in} = 250$  В;  $U_m = 2,5$  В;  $F \approx 1$ ;  $k_{PWM} = T / U_m$ . Тоді

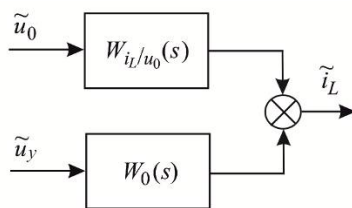
$$k_0 = \frac{k_i R_{CS}}{R_{diff0} - r_\Sigma} \cdot \frac{T n U_{in}}{U_m} = \frac{82 \cdot 75 \cdot 10^{-5}}{0,48} \cdot T \cdot \frac{250}{2,5} = 12,81T.$$

На рис. 2 наведено структурно-динамічну схему лінеаризованого перетворювача, яку доцільно використовувати для аналізу та синтезу систем традиційними інженерними методами.

**Задача.** Потрібно знайти параметри регулятора такі, щоб система «об'єкт-регулятор» задовольняла за регульованою змінною вимогам до точності (статичної помилки) та якості:

$$|y_{st}| \leq y_{st}^*, \quad \sigma \leq \sigma^*, \quad t_{reg} \leq t_{reg}^*,$$

де  $y_{st}^*, \sigma^*, t_{reg}^*$  – задані числа.



**Рисунок 2.** Структурна усереднена модель перетворювача

Виходячи з цих вимог, виберемо еталонний (бажаний) перехідний процес, який визначається наступною залежністю:

$$h_{ref}(t) = y_{st}^* (1 - e^{-t/T}) = y_{ref}(t) (\tau = t_{reg} / 3),$$

$$H_{ref} = \frac{y_{st}^* s - 1}{\tau s + 1}, \quad v = 0,$$

де  $y_{st} = \lim_{t \rightarrow \infty} y(t)$  – статична помилка [5];  $v$  – порядок астатизму;  $y_{st}^*$  – задане число.

Відповідний функціонал, для якого ця крива є екстремаллю, має вигляд

$$J = \int_0^\infty q_{11}^0 (y^2 + \tau^2 \dot{y}^2) dt, \quad q_{11}^0 > 0.$$

Якщо  $v = 1$  (астатизм першого порядку), то в якості еталонної перехідної характеристики виберемо монотонний перехідний процес:

$$h_{ref}(t) = 1 - e^{-\alpha_{ref} t}, \quad \alpha_{ref} = 1/\tau.$$

*Стабілізація вихідного струму під час керування за збуренням.* Цілком реально виключити вплив  $\tilde{u}_0$  на  $\tilde{i}_L = \tilde{i}_{arc}$  та за відсутності контуру від'ємного зворотного зв'язку. Умова абсолютної інваріантності лінеаризованої системи стабілізації до зміни напруги навантаження  $\tilde{u}_0$  фізично та практично реалізується.

Для цього достатньо прийняти  $W_d(s) = k_f = \frac{U_m}{nU_{in}}$ ,

$W_d(s)$  – передаточна функція регулятора прямого зв'язку по збурюючому впливу. Зв'язок по збурюючому впливу реалізується пропорційною ланкою (безінерційним підсилювачем).

Зрозуміло, повністю відмовитися від керування по відхиленню, необхідного для усунення помилки стабілізації, викликаной нелінійністю перетворювача, не вдається [6], [14].

*Стабілізація вихідного струму з використанням принципу зворотного зв'язку.* Синтез регуляторів на основі методу локалізації [7]-[9]. Нехай робоча модель об'єкта описується передаточною функцією (ПФ) по керуючому впливу ( $u$ ) до регульованої змінної – струму дуги ( $i$ ) у вигляді

$$W_0(s) = \frac{k_0}{\tau s - 1}. \tag{3}$$

Для стабілізації об'єкта (3) оберемо ПД регулятор типу

$$u = k_1(\tau^* s + 1)(i_{ref} - i), \quad i_{ref} = const, \tag{4}$$

де  $i_{ref}$  – струм завдання;  $k_1$  – коефіцієнт посилення регулятора. Підставляючи (4) рівняння об'єкта (3), отримаємо наступний опис системи:

$$s i = (\tau + k_{st} \tau^*)^{-1} [(1 - k_{st}) i + k_{st} (\tau^* s + 1) i_{ref}],$$

де  $k_{st} = k_0 k_1$  – статичний коефіцієнт перетворення розімкнутої системи.

При  $k_1 \rightarrow \infty$  це співвідношення вироджується у рівняння

$$i = (\tau^* s + 1)^{-1} (\tau^* s + 1) i_{ref}. \quad (5)$$

Вільна складова процесів у системі при цьому відповідає характеристичному рівнянню

$$\tau^* s + 1 = 0,$$

в якому задається лише один параметр регулятора  $\tau^*$ , що визначає її інерційність (5). Точність підпорядкування руху об'єкта рівнянню (5) залежить від чисельного значення коефіцієнта  $k_1$ . Достатня для практики ступінь наближення  $i(t) \rightarrow i^*(t)$  досягається при помірних значеннях коефіцієнта підсилення [15].

Рівняння реального ПД-регулятора має вигляд

$$u = k_1 \frac{\tau^* s + 1}{\mu s + 1} (i_{ref} - i),$$

де параметр  $\mu$  визначає інерційність диференціюючого фільтра. Його значення на порядок менше інерційності об'єкта керування (ОК) та еталонної системи  $\mu < \tau^* < \tau$ . Якщо синтезованій системі призначити, наприклад,  $k_1 = 8$  і  $\mu = 30 \cdot 10^{-6}$  с, то при зміні параметрів керованого об'єкта у широких межах динамічні властивості системи зберігатимуться практично без змін [15].

Структурна інтерпретація системи, заснованої на методі локалізації, для об'єкта, що розглядається, показана на рис. 3.

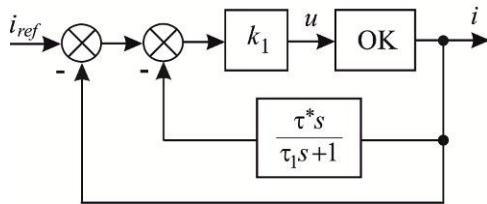


Рисунок 3. Структурна інтерпретація методу локалізації

Розглянемо тепер можливість застосування типового ПД-регулятора, алгоритм керування якого представимо у вигляді

$$u = k_1 [(\tau^* s + 1) + k_{int} s^{-1}] (i_{ref} - i), \quad (6)$$

де  $k_{int} = 1 / T_{int}$ ;  $T_{int}$  – постійна часу інтегрування.

В результаті підстановки (6) в (3) отримаємо опис системи

$$s i = (\tau + k_{st} \tau^*)^{-1} [(1 - k_{st}) i + k_{st} (\tau^* s + 1) i_{ref} + k_{st} k_{int} s^{-1} (i_{ref} - i)].$$

При  $k_1 \rightarrow \infty$  граничне співвідношення замкнутої системи визначається у вигляді

$$(\tau^* s^2 + s + k_u) i = (\tau^* s^2 + s + k_u) i_{ref}.$$

При цьому вільна складова рухів відповідає характеристичному рівнянню

$$\tau^* s^2 + s + k_u = 0.$$

У цьому випадку для отримання необхідних динамічних властивостей достатньо двох коефіцієнтів, а третій можна використовувати для забезпечення глибокої придушення впливу властивостей об'єкта і зовнішніх збурень.

Тепер зауважимо, що оскільки звичайне включення ПД-регулятора в канал помилки  $\varepsilon = i_{ref} - i$  передбачає режим відпрацювання початкових умов і збурень, то в режимах стеження або відпрацювання ступінчастих вхідних сигналів через диференціювання входу виникають які завгодно великі значення керуючих впливів, що технічно нереалізовано. Очевидно, що в такому випадку необхідно перенести точку входу диференціюючого каналу з сигналу помилки  $\varepsilon$  на вихідний  $-i$ , тобто реалізувати ПД-алгоритм у вигляді

$$u = k_1 [k_{int} s^{-1} (i_{ref} - i) - (\tau^* s + 1) i].$$

Оскільки при такому способі керування диференціюється тільки сигнал зворотного зв'язку, який зазвичай змінюється повільно, то на виході диференціюючого каналу не виникає «кидків», що призводять до будь-яких великих значень керування. Вважається при цьому, що наявний ресурс керування по керуючій функції  $u$  достатній для здійснення призначеної траєкторії.

Структурна схема контуру керування у цьому випадку, відповідна алгоритму формування керуючої функції (6), представлена на рис. 4.

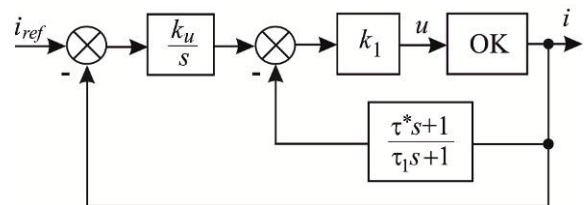


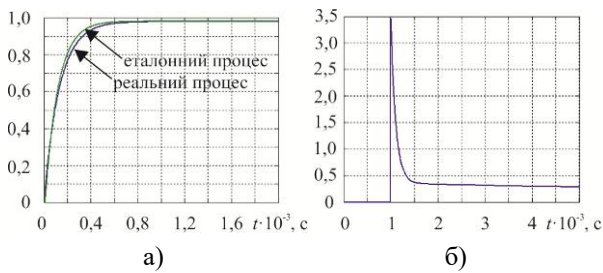
Рисунок 4. Схема системи з ПД-регулятором

**Експерименти.** Перевірка проводилася на моделі перетворювача, побудованої в середовищі *Matlab R2014a, Simulink Library*.

Моделювання проводилося при таких параметрах перетворювача і навантаження:  $r_\Sigma = 0,01$  Ом,  $L = 300 \cdot 10^{-6}$  Гн,  $R_{diff0} = -0,49$  Ом,  $U_0 = 170$  В,  $U_{in} = 250$  В,  $T = 19,2 \cdot 10^{-6}$  с.

На рис. 5 представлені осцилограми відпрацювання стрибка задаючого впливу при нульових початкових умовах. З рис. 5 видно, що цей регулятор забез-

печує якість процесів, що відповідає заданим вимогам – вихід системи (рис. 5) збігається із заданою точністю з еталонною характеристикою.



**Рисунок 5.** Графіки перехідних процесів (а) та зміна керуючого впливу в системі (б)

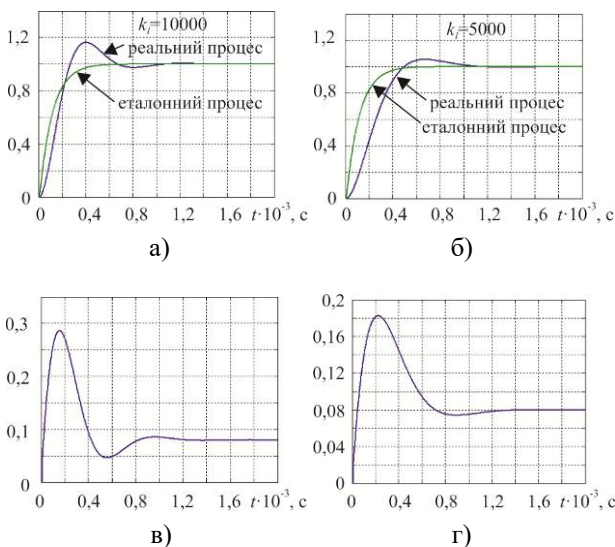
При використанні І-регулятора вихідна величина  $u(t)$  – керуючий сигнал, пропорційний інтегралу від вхідної величини  $\varepsilon(t)$

$$u(t) = k_I \int_0^t \varepsilon(\tau) d\tau .$$

Коефіцієнт передачі  $k_I$  є параметром налаштування І-регулятора, що визначається формулою

$$W_{CD}(j\omega) = \frac{k_I}{\omega} e^{-j\pi/2} .$$

Оцінимо тепер вплив параметрів регулятора на динамічні параметри стабілізатора струму. Так, наприклад, при величині інтегральної складової рівної 10000 (рис. 6, а) величина перерегулювання становить майже 16 %, а час перехідного процесу –  $1,2 \cdot 10^{-3}$  с. Подальше зменшення інтегральної складової до 5000 дозволяє зберегти час перехідного процесу на колишньому рівні, а перерегулювання скоротити майже на 60 % (рис. 6, б).

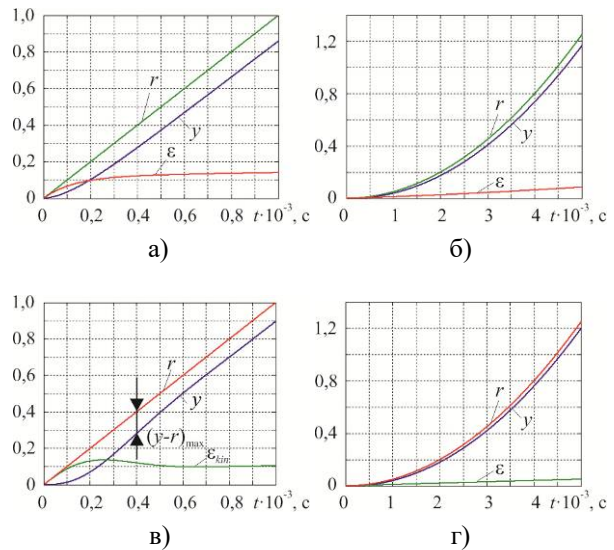


**Рисунок 6.** Графіки перехідних процесів (а, б) та зміна керуючого впливу в системі (в, г)

Зменшення величини  $k_I$  дозволяє послабити коливальний характер процесу та прискорити його згасання.

На рис. 7 показаний процес відстеження слідкуючою системою лінійного та квадратичного законів зміни вхідного впливу при  $v = 0$  (а, б) та  $v = 1$  (в, г). При порядку астатизму  $v = 1$  графік на рис. 7, в, містить встановлену (кінематичну) помилку  $\varepsilon_{kin}$ , що визначається з виразу [5], [6]

$$\varepsilon_{kin} = \dot{y}(t) / k_{kin} .$$



**Рисунок 7.** Реакції слідкуючої системи на різні вхідні процеси: змінний лінійно (а, в), параболічний (квадратичний) (б, г)

За поведінкою графіків  $y(t)$  щодо  $y_{ref}(t) = r(t)$  – задаючий вплив, оцінюють такі показники якості, як час регулювання  $t_{reg}$  або  $(y - r)_{max}$  [5].

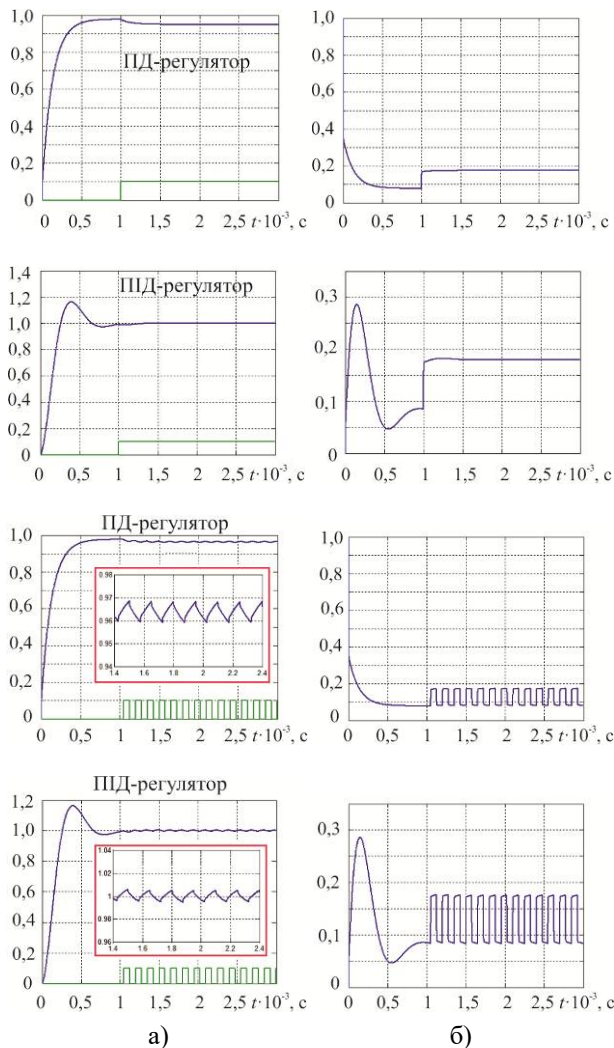
З рис. 7, а, б слідує, що при лінійній зміні і зміні по квадратичному закону напруга неузгодженість стабілізатора струму без астатизму зростає у часі, а напруга неузгодженості стабілізатора з астатизмом першого порядку (рис. 7, в) містить постійну кінематичну (швидкісну) помилку.

Графіки зміни перехідного процесу та керуючого впливу при дії на вході системи ступінчастого збурення та імпульсному характері навантаження ( $u_0$ ) показані на рис. 8.

Відповідно до часових діаграм (рис. 8) сплески провали струму не перевищують 1% від вихідного струму регулятора, тривалість перехідних процесів – 0,5 мс.

Зрозуміло, стрибкоподібна зміна напруги навантаження – ідеалізація реальних змін. Навіть незначне згладжування стрибка напруги  $U_0$  помітно зменшує «просідання» вихідного струму.



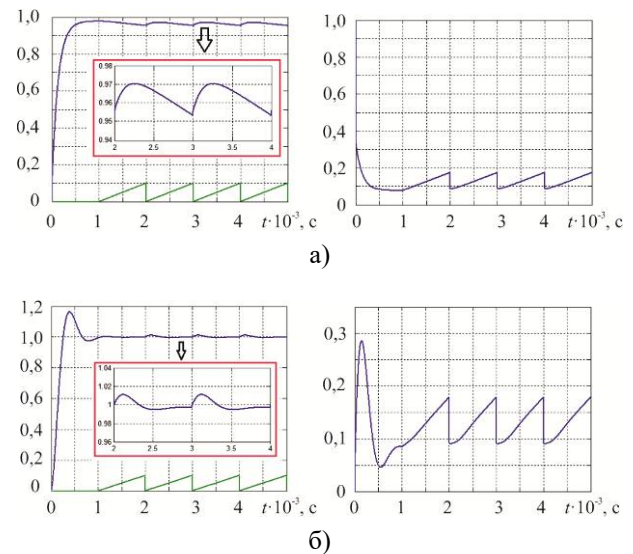


**Рисунок 8.** Часові діаграми струму дроселя перетворювача при ненульових початкових умовах (а) та сигналу керування (б) у системі при дії ступінчастого збурення та імпульсному характері навантаження

При виділенні з багатьох зовнішніх збурень ланцюга «джерело живлення – дуга» враховано, що для плазмотронів характерні періодичні пробої між дугою і стінкою камери, що викликають різку зміну напруги на плазмотроні (ефект шунтування) [10]. Окремий імпульс пульсації напруги, що виникає за рахунок шунтування дуги, має форму позитивного трикутного імпульсу, час наростання якого значно більше, ніж спаду [10].

Припустимо, що тривалість окремого імпульсу близька до 1 мс, а амплітуда  $U_{0m}^* = 0,1$  [10]. Форма імпульсу пульсації напруги з такими параметрами показано на рис. 9.

На рис. 9 наведено графіки перехідних характеристик у системі перетворювач – широкосмуговий регулятор, збуджений пилкоподібною зміною напруги навантаження.



**Рисунок 9.** Перехідні процеси при пробі в плазмотроні: ПД-регулятор (а), ПІ-регулятор (б)

З даних, представлених на рис. 9, видно, що пульсації струму дуги при пульсаціях напруги навантаження становлять приблизно 1%, тобто. близько 1 А.

Природно, що коефіцієнти реальної системи відрізняються від розрахункових із-за їх неточного обчислення чи виміру, зміни з часом і інших чинників. У цьому випадку реальні значення  $\bar{k}_0$ ,  $\bar{\tau}_0$  параметрів ПФ (3) також відрізняються від розрахункових, так що

$$\bar{\tau}_0 = \tau_0 + \Delta\tau_0, \quad \bar{k}_0 = k_0 + \Delta k_0,$$

де  $\Delta\tau_0$ ,  $\Delta k_0$  – числа, що задовольняють нерівностям

$$|\Delta\tau| \leq \chi, \quad |\Delta k_0| \leq \delta,$$

у яких  $\chi$ ,  $\delta$  – задані невід'ємні числа, що є значенням допусків на зміну відповідних параметрів.

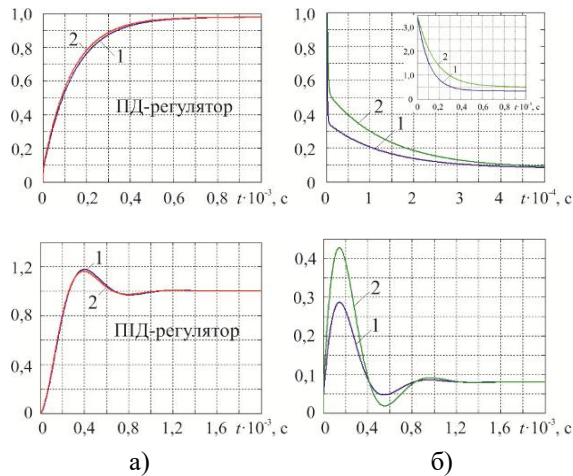
Дослідимо можливості регуляторів за зміни параметрів об'єкта. Нехай постійний час об'єкта керування (3) змінюється на 50 %.

Перехідні процеси в системі з регуляторами, розрахованими для різних значень  $\tau_0$  методом локалізації та графіки зміни керуючих впливів, представлені на рис. 10. Як видно із рис. 10, у цій системі зміни властивостей об'єкта мало впливають на якість перехідного процесу, а керуюча дія не зазнає якісної зміни, при цьому ресурс керування залишається майже незмінним.

Як видно, системи, керовані за методом локалізації, мають малу чутливість до зміни параметрів у широких межах. Такі властивості цих алгоритмів керування важливі для практичних додатків.

Для порівняння властивостей регуляторів на вхід замкнутої системи з відповідними регуляторами по-

давалися випадкові тестові вхідні сигнали, що моделюють напругу навантаження [4].



**Рисунок 10.** Вплив зміни постійної часу на властивості системи: а – перехідні характеристики; б – графіки зміни керуючого впливу  $1 - \tau_0 = 625 \cdot 10^{-6}$  с;  $2 - \tau_0 = 1 \cdot 10^{-3}$  с

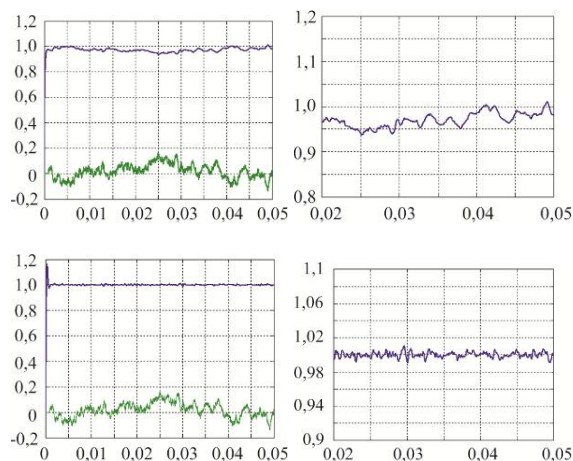
Для реалізації випадкового процесу зі спектральною густиною [4]

$$S(\omega) = \frac{2\alpha D}{\alpha^2 + \omega^2} \quad (\alpha = 529,24; D = 555,21)$$

використовувався формуючий фільтр з ПФ

$$W(s) = \frac{\sqrt{2\alpha D}}{\alpha + s} = \frac{765,24}{529,4 + s}$$

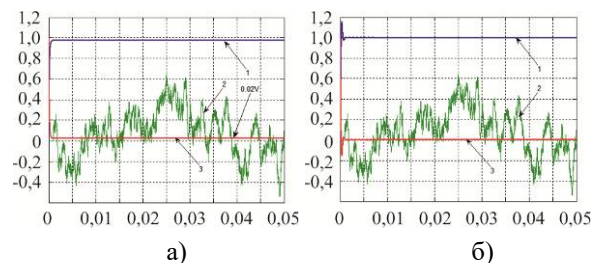
В результаті моделювання були отримані реакції замкнутих систем по керуваній змінній на відповідний вид зовнішнього впливу. Отримані результати моделювання наведено на рис. 11.



**Рисунок 11.** Спільні графіки відхилень напруги навантаження та струму дуги при впливі на вхід замкнутої системи випадкового збурення (на рис. праворуч наведено графіки у збільшеному масштабі)

Для оцінки статичної помилки при дії зовнішнього збурення проведемо моделювання для перетворювача із прямим зв'язком. На рис. 12 відображено результати моделювання. Введення у схему стабілізатора прямого зв'язку з коефіцієнтом  $k_f$ , що визначається згідно з заданим рівнянням, дозволяє отримати нульову статичну помилку регульованого параметра при зміні напруги навантаження.

Таким чином, можна констатувати, що оптимальний регулятор забезпечує найкраще відхилення координати керованого об'єкта за будь-якого вхідного сигналу. Це цілком зрозуміло – будучи регулятором, що забезпечує компенсацію найгіршого випадку вхідних збурень, він добре справляється з іншими випадками. У той же час, при заданих рівнях середньої анізотропії вхідного сигналу регулятори парирують збурення з набагато меншими енергетичними витратами по керуванню в порівнянні з традиційним регулятором.



**Рисунок 12.** Осцилограми випадкового відхилення напруги навантаження  $u_0$  (2), напруги неузгодженості  $\epsilon$  (3) та струму дуги  $i$  (1) комбінованого стабілізатора: а – ПД-регулятор, б – ПД-регулятор

Досить висока якість стабілізації струму дуги забезпечена при використанні систем керування за властивістю інваріантності та розв'язання задач оптимізації в класі «хороших» регуляторів, побудованих на основі методу локалізації.

Таким чином, регулятори, розраховані на основі співвідношень методу локалізації, забезпечують необхідну якість процесів і мають властивість грубості (робастності) по відношенню до відхилення параметрів об'єкта від номіналів у широкому діапазоні.

Отже, якщо об'єкт містить нестационарні параметри або його властивості не повністю відомі, краще використовувати для розрахунку регулятора метод локалізації.

Основні показники пристрою живлення мають такі значення на виході:

1. Нестабільність струму в стаціонарному режимі – трохи більше 3 %.
2. Рівень пульсацій струму при постійному навантаженні – трохи більше 2 %.
3. Сплески струму при стрибках навантаження до 30% – трохи більше 5 %.

За результатами проведеного дослідження можна

надати такі рекомендації до вибору регулятора: у розглянутому випадку краще використовувати для розрахунку параметрів регулятора метод локалізації.

Порівнюючи можливості типових регуляторів, отриманих на основі спектрального та частотного методів [7-9], з регуляторами, розрахованими за методом локалізації, слід зазначити наступне. Перехідні процеси у першому випадку тривають набагато швидше заданих вимог [7-9], а в системі з регулятором, розрахованим за методом локалізації, процес точно відповідає завданню. При збільшенні постійної часу об'єкта для першого випадку зменшується перерегулювання та збільшується час перехідного процесу, ресурс керування залишається постійним, а при зменшенні постійної часу зростає коливання.

У другому випадку зміни постійної часу об'єкта керування практично не впливають на якість перехідного процесу, а необхідний керуючий вплив, у такого регулятора в кілька разів менше.

### V. ВИСНОВКИ

1. Досить висока якість стабілізації струму дуги в статистиці та динаміці забезпечує поєднання керування по напрузі навантаження зі зворотним зв'язком щодо відхилення вихідного струму (використання принципу комбінованого керування).

2. Основну роль стабілізації вихідного струму має грати керування за збуренням.

3. Використання замкнутого контуру, розрахованого за методом локалізації, дозволяє помітно підвищити якість стабілізації в перехідних режимах. Перевага даного підходу для вирішення завдання з урахуванням зазначених вище особливостей у тому, що коефіцієнти розрахованого регулятора не залежать від властивостей об'єкта. Це дозволяє забезпечити необхідну динамічну якість процесів у системі з немінімально-фазовим об'єктом з нелінійними характеристиками, параметрами, що змінюються, і при дії зовнішніх неконтрольованих збурень.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Jia Deli, You Bo, Zhang Xueyan On Fuzzy-PI Control for Inverted Plasma Cutting Power Supply/ Proceedings of the 27th Chinese Control Conference July 16-18, 2008, Kunming, Yunnan, China. – P. 335-339.
- [2] Jia Deli, You Bo An intelligent control strategy for plasma arc cutting technology. Journal of Manufacturing Processes 13 (2011). P. 1-7.
- [3] Guoping Li, Qi Cao, Yujian Fu Research on Current Control Technology of Fine Plasma Cutting.

International Symposium on Mechanical Engineering and Material Science (ISMEMS 2016). Volume 93. P. 380-386.

- [4] Воронов А.Ю., Герасимов В.А. Регулирование тока сжатой дуги в канале плазматрона // Изв. Томского политехн. ун-та. – 2011. Т3. – №4. – С.313-135.
- [5] Воронов А.А. Основы теории автоматического управления. Ч.1 – М.: Энергия, 1965. – 362 с.
- [6] Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. – М.: Наука, 1975. – 768 с.
- [7] Востриков А.С. Проблема синтеза регуляторов для систем автоматики: состояние и перспективы // Автоматрия, 2010. Т. 46. № 2. С. 3-19.
- [8] Востриков А.С., Французова Г.А. Теория автоматического регулирования. – М.: Высшая школа, 2-е изд. – 2006. – 356 с.
- [9] Востриков А.С., Уткин В.И., Французова Г.А. Системы с производной вектора состояния в управлении // Автоматика и телемеханика. 1982. № 3. С. 22-25.
- [10] Комаров Н.С. Устройства электропитания мощных дуговых нагревателей для установок газификации отходов // Технична електродинаміка. – 2009. – №1. – С. 70-76.
- [11] Уланов Г.М. Статистические и информационные вопросы управления по возмущению. – М.: Энергия, 1970. – 255 с.
- [12] Мееров М.В. Синтез структур систем автоматического регулирования высокой точности. – М.: Наука, 1967. – 423 с.
- [13] Кухтенко А.И. Проблема инвариантности в автоматике. – К.: Гос. Изд-во техн. лит-ры, УССР, 1963. – 376 с.
- [14] Филлипс Ч., Харбор Р. Системы управления с обратной связью. – М.: Лаборатория базовых знаний. 2001. – 616 с.
- [15] Крутько П.Д. Обратные задачи динамики в теории автоматического управления / П.Д. Крутько. – М.: Машиностроение, 2004. – 576 с.
- [16] Верещага Є.М., Костюченко В.І. Моделювання схем джерел електроживлення зварювальної дуги в *MATLAB / SIMULINK* // Електротехніка та електроенергетика. – 2021. – №3. – С. 8 – 20. DOI: 10.15588/1607-6761-2021-3-1

Стаття надійшла до редакції 28.06.2023

## IMPROVING THE QUALITY OF THE STABILIZATION OF THE OUTPUT CURRENT OF THE PULSE DC CONVERTER OPERATING ON A PLASMA ARC

VERESHCHAGO E.M. PhD, Associate Professor of the Department of Marine Instrument, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: venmkua@gmail.com;

KOSTIUCHENKO V.I. PhD, Associate Professor of the Department of Marine Electric Power Systems, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: vitalii.kostiuchenko@nuos.edu.ua;

**Purpose.** Improving the quality indicators of control processes for pulsed DC converters operating on an arc load, based on the construction of procedures for the synthesis of robust systems.

**Methodology.** A method of improving the quality of stabilization of the output current of a pulsed direct current converter based on a combination of disturbance control with control of the output current deviation from a given value (localization method) is considered.

**Findings.** The article deals with the solution of the optimization problems of the output current stabilization system of the pulsed direct current converter feeding the plasma arc under, among other things, stochastic external influences in connection with the problems of non-roughness and strict implementation of optimal regulators and the solution of optimization problems according to the quality of invariance. Methods for constructing optimal controllers are considered and the possibility of solving the optimization problem by the invariance property is established. Examples of solving deterministic and stochastic optimization tasks are given, taking into account the properties of roughness, structural and strict implementation of the stabilizing regulator.

Better accuracy of arc current stabilization in statics and dynamics is provided, which is confirmed by simulation modeling. The quality of arc current stabilization is achieved when using control systems based on the quality of invariance and solving optimization problems in the class of "good" regulators built on the basis of the localization method. Regulators calculated on the basis of the correlations of the localization method provide the required quality of the processes and have the property of roughness (robustness) in relation to the deviation of the object parameters from the nominal values in a wide range. If the object contains non-stationary parameters or its properties are not fully known, in this case it is better to use the localization method to calculate the controller.

**Originality.** We received further development of the procedure for the synthesis of optimal regulators and methods of solving optimization problems by the property of invariance.

**Practical value.** On the basis of the method of combined control and the concepts of localization, the optimal laws of control of free and forced movements of a one-dimensional system are synthesized. The latter, however, has the property of rudeness. The efficiency of the synthesized algorithms is illustrated by the results of mathematical modeling.

**Keywords:** stabilization quality; DC pulse converter; plasma arc; combined control.

### REFERENCES

- [1] Jia Deli, You Bo, Zhang Xueyan On Fuzzy-PI (2008). Control for Inverted Plasma Cutting Power Supply. Proceedings of the 27th Chinese Control Conference July 16-18, Kunming, Yunnan, China, P. 335-339.
- [2] Jia Deli, You Bo (2011). An intelligent control strategy for plasma arc cutting technology. Journal of Manufacturing Processes 13, P. 1–7.
- [3] Guoping Li, Qi Cao, Yujian Fu Research on Current Control Technology of Fine Plasma Cutting. International Symposium on Mechanical Engineering and Material Science (ISMEMS 2016). Volume 93. P. 380-386.
- [4] Voronov A.Yu., Gerasimov V.A. (2011). Regulation of the compressed arc current in the plasma torch channel, Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, vol. 3, No 4, pp. 313-135.
- [5] Voronov A.A. (1965). Fundamentals of the theory of automatic control. Part 1. Moscow, Energy, 362 p.
- [6] Besekersky V.A., Popov E.P. (1975). Theory of automatic control systems. Moscow, Nauka, 768 p.
- [7] Vostrikov A.S. (2010). The problem of synthesizing controllers for automation systems: state of the art

- and prospects, *Avtometriya*, vol. 46, No 2, pp. 3-19.
- [8] Vostrikov A.S., Frantsuzova G.A. (2006). Theory of automatic control. Moscow, Higher school, 2nd ed., 356 p.
- [9] Vostrikov A.S., Utkin V.I., Frantsuzova G.A. (1982). Systems with the derivative of the state vector in control, *Automation and Telemekhanics*, No 3, pp. 22-25.
- [10] Komarov N.S. (2009). Power supply devices for powerful arc heaters for waste gasification plants, *Technical electrodynamics*, No 1, pp. 70-76.
- [11] Ulanov G. M. (1970). Statistical and informational issues of perturbation control, Moscow, Energy, 255 p.
- [12] Meerov M. V. (1967). Synthesis of structures of automatic control systems of high accuracy, Moscow, Nauka, 423 p.
- [13] Kukhtenko A. I. (1963). The problem of invariance in automation, Kyiv, State. Publishing house of tech. literature, Ukrainian SSR, 376 p.
- [14] Phillips Ch., Harbor R. (2001). Feedback control systems, Moscow, Laboratory of basic knowledge, 616 p.
- [15] Krutko P.D. (2004). Inverse problems of dynamics in the theory of automatic control, Moscow, Mechanical engineering, 576 p.
- [16] Vereshchago E.M., Kostiuchenko V.I. (2021). Modeling of circuits for electrically driven arc welding in MATLAB / SIMULINK. *Electrical Engineering and Power Engineering*, No 3, pp. 8-20. DOI: 10.15588/1607-6761-2021-3-1



УДК 621-926

## МОДЕЛЮВАННЯ АВТОНОМНИХ ІНВЕРТОРІВ НАПРУГИ ДЖЕРЕЛ ЖИВЛЕННЯ ОДНОФАЗНИХ АСИНХРОННИХ ПРИВОДІВ

- БОРОДАЙ В.А.** канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електропривода Національного ТУ „Дніпровська політехніка”, Дніпро, Україна, e-mail: borodai.v.a@nmu.one;
- НЕСТЕРОВА О.Ю.** канд. педагог. наук, доцент, завідувач кафедри філософії та педагогіки Національного ТУ „Дніпровська політехніка”, Дніпро, Україна, e-mail: nesterova.o.yu@nmu.one.
- БОРОВИК Р.О.** інженер, старший викладач кафедри електропривода Національного ТУ „Дніпровська політехніка”, Дніпро, Україна, e-mail: borovyk.r.o@nmu.one;
- ФЕДОРОВ С.І.** інженер, старший викладач кафедри електротехніки Національного ТУ „Дніпровська політехніка”, Дніпро, Україна, e-mail: fedorov.s.i@nmu.one;

**Мета роботи.** Розробка оригінальних моделей інверторів напруги адаптованих до управління однофазним асинхронним двигуном із подальшою перспективою побудови автоматичних систем підвищення енергоефективності побутових механізмів, а також розробки навчальних комплексів вивчення роботи перетворювачів частоти для формування навичок з їх ремонту та налагодження.

**Методи досліджень.** Для проведення досліджень використані положення теорії електричних машин, методи синтезу цифрових систем керування, способи та методи моделювання у САПР електронна лабораторія компанії NATIONAL INSTRUMENTS складової Multisim, методи схемотехнічного проектування.

**Отримані результати.** Розроблено та побудовано моделі розподільників імпульсів для випадків живлення однофазних асинхронних двигунів з мостовими роздільно-індивідуальними інверторами пускової та робочої обмоток, напівмостових інверторів із двополярним джерелом живленням та трифазного інвертора із керуванням за 180 градусною діаграмою управління. Отримано часові діаграми наочного підтвердження працездатності системи за задекларованими принципами.

**Наукова новизна.** Запропоновано ряд оригінальних діаграм перемикання ключів силової ланки моделей розподільників імпульсів автономних інверторів напруги із врахуванням фазового зсуву та тривалості пауз перемикання плечей силового блоку задля уникнення аварійних режимів, надано рекомендації щодо рівнів частот генерації, які подаються на вхід комбінаційних схем, показано перспективу використання даної системи у складі однофазного асинхронного електропривода із можливістю енергоефективного керування.

**Практична цінність.** Запропоновані оригінальні модельні рішення автономних інверторів напруги, які адаптовані до сумісної роботи із однофазним АД, можуть бути корисними для розробників перетворювальної техніки та стати наочним матеріалом для застосування їх у навчальному процесі із підготовки фахівців спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

**Ключові слова:** моделювання, автономний інвертор напруги, топологія силової частини, розподільники імпульсів, однофазний асинхронний двигун.

### ВСТУП

Відомо, що сучасні домогосподарства мають досить значний парк побутового електромеханічного обладнання. Головним його приводом у більшості є однофазний нерегульований асинхронний двигун, який переважно використовується без засобів ефективного електроспоживання. Зважаючи на регулярне зростання вартості вторинних енергоресурсів, для власників обладнання має сенс залучати системи електропривода із комплексним підходом до забезпечення енергозбереження. Хоча слід підкреслити, що при використанні однофазних асинхронних двигунів (АД) виникають особливості, які дещо відрізняються від роботи трифазних машин. Крім того, досвід розробок такого типу [1]-[3] свідчить про нераціональність залучення промислових перетворювачів частоти через

їх значну вартість.

Завдання розробки моделей інверторів напруги для однофазних систем асинхронного електропривода одночасно можуть бути задіяні у навчальному процесі як засіб наочної демонстрації електромагнітних процесів та виконання практичних завдань з приводу вивчення принципів роботи, схемних рішень та методів їх наладки.

### АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Загально відомі способи фазового та амплітудного регулювання [4], [5] швидкості обертання вихідного валу однофазних асинхронних електричних мікромашин є морально застарілими і характеризуються енерговитратними наслідками управління, що проявляється у вигляді зміни симетричного магнітного поля

номінального режиму на поле не симетричне протягом регулювання.

Технічне рішення [6] щодо живлення допоміжних трифазних АД від трифазного автономного інвертора напруги (АІН) із регулюванням продуктивності двигунів-вентиляторів, а також формування їх перехідних режимів дозволяє досягти високого використання систем такого типу. За очевидної переваги все одно дана система мало придатна для використання у складі асинхронних приводів із однофазними електродвигунами.

Інвертор потужності 1 кВт [7], що моделюється з синусоїдальною формою вихідної напруги, призначений для подачі змінного струму стандартної частоти 50 Гц в локально-незалежну мережу від фотоелектричного елемента. Одночасно він дозволяє подавляти гармоніки, що знижує гармонійні спотворення і відповідно підвищує якість електроенергії. Наявні переваги не гарантують якісної роботи активно-індуктивного навантаження. Тому систему такого типу потрібно додатково дослідити на цей предмет.

В джерелі [8] розглядається однофазна асинхронна машина, яка є головним споживачем електроенергії у побутових умовах. Наявність у схемі двигуна фазо-зсувних конденсаторів демонструє значний рівень пульсацій крутного моменту протягом запуску та сталого режиму, що викликає вібрації та шум у машині. У рамках стратегії пом'якшення такої проблеми розроблена та досліджена модель привода із двофазним інвертором з розімкнутим контуром для зменшення небажаних пульсацій. Результати моделювання демонструють досягнення бажаного результату, хоча запропонована система утруднює регулювання швидкості.

В публікації [9] пропонується скористатися репрезентативним контролером VGPI для управління швидкістю приводу асинхронного двигуна із короткозамкненим ротором (SCIM) з широтно-імпульсною модуляцією для подолання небажаного пікового перевищення динамічного відстеження швидкості або збурення крутного моменту навантаження. Система, яка пропонується, має ускладнену конструкцію, що може стати причиною досить коштовного кінцевого виробу і не прийнятною для споживача через зменшення конкурентних якостей.

Робочий період електронного комутатора [10], який керує послідовно увімкненими конденсаторами з пусковою обмоткою АД, регулюється так, аби отримати оптимальні значення ємності конденсатора за умови забезпечення максимального крутного моменту двигуна. Моделювання системи протягом дії змінного навантаження у перехідних та сталих режимах підтверджує очікувану якість роботи електричної машини. З точки зору енергоефективності даний спосіб є недосконалим хоча і досить простий у реалізації.

Моделювання однофазної системи засобами

Matlab [11] передбачає конструкцію, до складу якої входять: джерело постійного струму напруги 300 В, інвертор PWM, LC-фільтр і активне навантаження. Результат досліджень демонструє стабільну роботу перетворювальної системи на активне навантаження. Проте, як система буде себе поводити на активно-реактивне навантаження невідомо.

В [12] розглянуто спосіб економічно ефективного регулювання швидкості АД. Поставлене завдання досягається раціональним регулюванням фази і рівня струму пускової обмотки за номінальної напруги в робочій обмотці. Спосіб дає деяке підвищення ефективності але результат є недостатнім.

Проект [13] призначений для регулювання швидкості однофазного асинхронного двигуна за допомогою простої системи управління, яку зазвичай використовують у побутовій механізації. Запропонована система дає гнучку можливість регулювання продуктивності механізму на власний розсуд некваліфікованого користувача, що нечасто дозволяє здійснювати регулювання за раціональним способом споживання електричної енергії.

Векторно-алгоритмічне управління однофазно-трифазного реверсивного комутатора [14], веденого мережею, передбачає подачу однофазної змінної напруги в статорні обмотки шляхом комутації силових ключів. Це утворює в них обертове магнітне поле. За таких умов запуск трифазних АД від однофазної мережі і навантажені не більше 70 % номінального у багатьох випадках задовольняє бажаним умовам експлуатації. При усьому цьому така система забезпечує регулювання швидкості із деякими обмеженнями.

Схемне рішення [15], [16] трифазно-однофазного асинхронного електроприводу з триелементним фазозміщуючим модулем дозволяє отримати симетричний режим у широкому діапазоні зміни навантажень. Головним недоліком системи є ступеневе регулювання, що не завжди може бути задіяно для механізмів, де вимагається значний діапазон зміни пріоритетної координати керування.

Запропонований перелік технічних рішень у випадку плавного регулювання координат однофазних АД з короткозамкненим ротором мало придатний для використання. На погляд авторів, для таких випадків є сенс скористатися системами із частотним управлінням та способами енергоощадної експлуатації.

## МЕТА РОБОТИ

Розробка оригінальних моделей інверторів напруги, адаптованих до управління однофазним асинхронним двигуном із подальшою перспективою побудови автоматичних систем підвищення енергоефективності побутових механізмів, а також розробки навчальних комплексів вивчення роботи перетворювачів частоти для формування навичок з їх ремонту та налагодження.

**ВИКЛАД ГОЛОВНОГО МАТЕРІАЛУ Й АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ**

Конструкційна особливість однофазних АД передбачає наявність у їх складі робочої та пускової обмоток, які геометрично розташовують під кутом 90 градусів на статорі електричної машини. При цьому їх живлення повинно здійснюватися напругою з фазовим зсувом в 90 електричних градусів. Виконання таких умов диктується необхідністю утворення обертового симетричного магнітного поля статора, що закладено у принцип роботи асинхронного електричного двигуна.

Натепер існує декілька версій конструкцій АД. Найпоширеніша у побутових приладах має конструкцію з однаковими пусковою та робочою обмотками, де остання вмикається в електричну мережу через фазо-зсувну ємність (так звані конденсаторні АД). Можуть зустрічатися конструкції машин, які передбачають вмикання пускової обмотки тільки на час запуску. По його завершенню більш «слабка» пускова обмотка вимикається, що сприяє утворенню пульсуючого магнітного поля статора. Відповідно, за такого вмикання машини дещо втрачається потужність. Існують конструкції малопотужних АД із розщеплени-

ми полюсами та наявністю на них коротко замкненого витка. Такі машини мають високу перевантажувальну здатність, але не дозволяють виконувати реверсування. Таким чином, для отримання найкращих технічних показників АД у побутових пристроях із необхідністю регулювання та реверсування машини краще використовувати конструкцію із однаковими характеристиками, як робочої, так і пускової обмоток.

Для пріоритетної версії АД отримати ефективне керування можливо навіть за відсутності спеціальної фазо-зсувної ланки. Для цього потрібно використання спеціального силового електронного перетворювача із відповідною схемою розподільника імпульсів комутації транзисторів. Авторами публікації пропонується три топології реалізації автономного інвертора, які будуються на силовій ланці з однофазним мостовим роздільно-індивідуальним, напівмостовим і джерелом подвійного живлення та трифазної мостової системи перетворення із керуванням за 180° діаграмою.

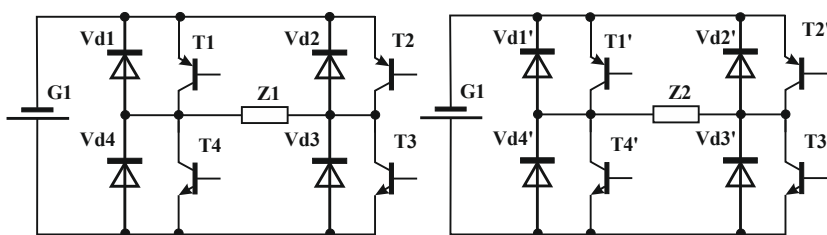
Почнемо розгляд запропонованих версій автономних інверторів із топології однофазної мостової роздільної схеми. Для її реалізації використана принципова схема силової частини рис.1 та розроблена таблиця перемикання ключів (табл.1)

№ п.п.	x3	x2	x1	x0	T1	T2	T3	T4	T1'	T2'	T3'	T4'
0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	1
1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
2	0	0	1	0	0	1	0	1	1	1	0	0
3	0	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1
4	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1
5	0	1	0	1	1	1	0	0	0	1	0	1
6	0	1	1	0	1	0	1	0	0	1	0	1
7	0	1	1	1	1	0	1	0	1	1	0	0
8	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1
9	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1

**Таблиця 1.**

Діаграма перемикань ключів.

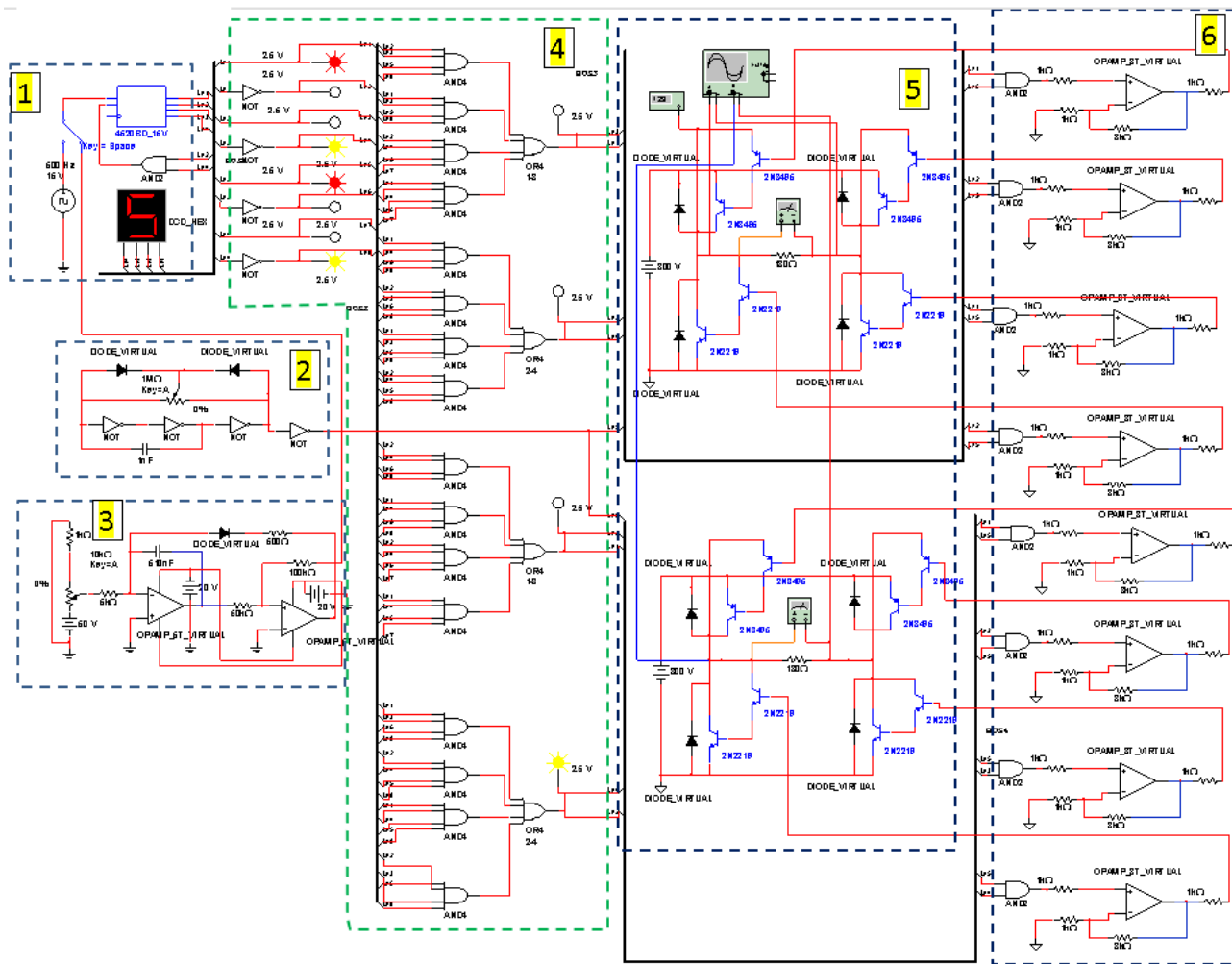
x0...x3 - вхідний параметр, T1...T4 і T1'...T4' - номер ключа



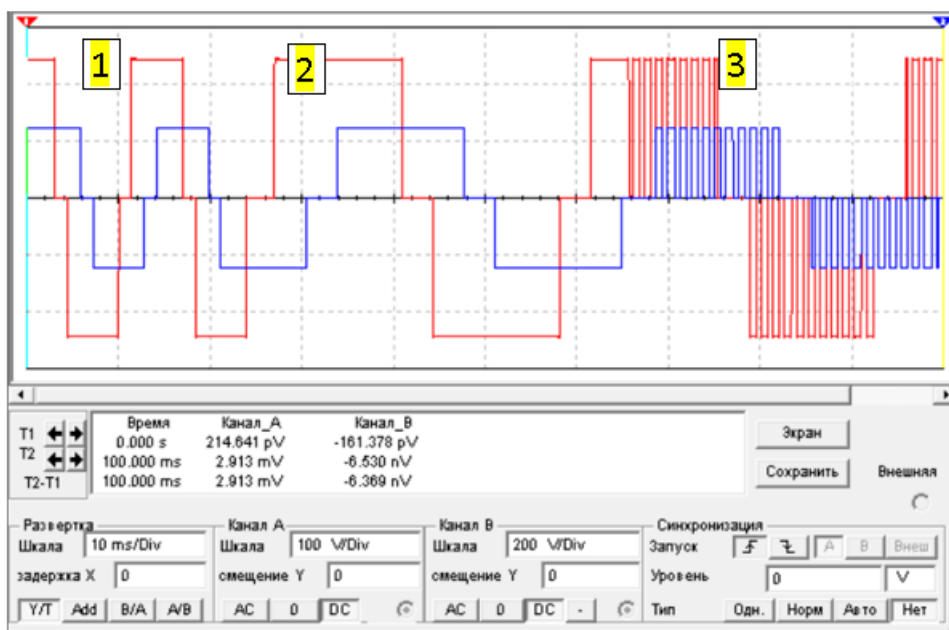
**Рисунок 1.** Силова ланка роздільного однофазного живлення, де Z1, Z2 робоча і пускова обмотки

Для такого схемного рішення живлення інверторів здійснюється від одного джерела G1. Кожен ключ охоплено зворотнім діодом із метою уникнути виникнення аварійних режимів. Для запропонованих схем (рис.1) і діаграми перемикання ключів (табл.1) побудована модель (рис.2, а) засобами електронної лабораторії Multisim. До складу системи входять (рис.2, а): 1 – лічильник вхідних сигналів; 2 – генератор регульованої шпаруватості; 3 – перетворювач напруга-частота; 4 – розподільник імпульсів; 5 – силова ланка перетворення; 6 – підсилювачі узгодження потужнос-

ті. Результати моделювання зміни напруги пропонується переглянути на рис.2, б). Запропонований автономний інвертор напруги спроможний здійснювати регулювання за двома зонами. Тобто за напругою та частотою одночасно, при цьому автоматично підтримується фазовий зсув між напругами на робочій та пусковій обмотках, за принципом роботи, який вимагається однофазним АД. Перетворювач має можливість регулювання напруги від 0 до 220 В (рис. 2, б, 3) і частоти від 0 до 72 Гц (рис.2, б, 1,2). За досить стабільної та безвідмовної роботи така схема має велику



а)



— Напряга на робочій обмотці,  
Канал А, масштаб  
100 В / Діл;

— Напряга на пускової обмотці, канал В, масштаб 200 В / Діл.

- 1 – частота 72 Гц;
- 2 – частота 31 Гц;
- 3 – частота 31 Гц із зниженою напругою.

б)

Рисунок 2. Модель та результат досліджень схеми роздільно-незалежних інверторів

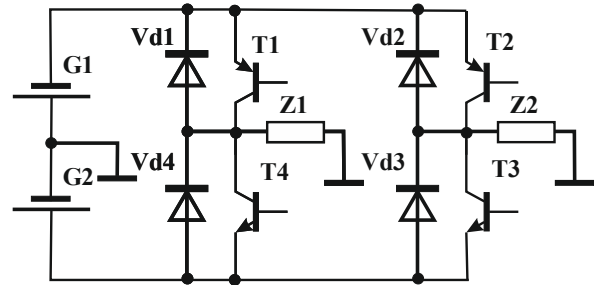
кількість елементів ланки перетворення, що робить її мало конкурентною.

Наступний варіант схемного рішення – роздільне живлення з напівмостовими силовими схемами і по-

двійними схемами джерел живлення (рис.3, б).

Розроблена модель та результати її випробувань демонструються на рис.4.

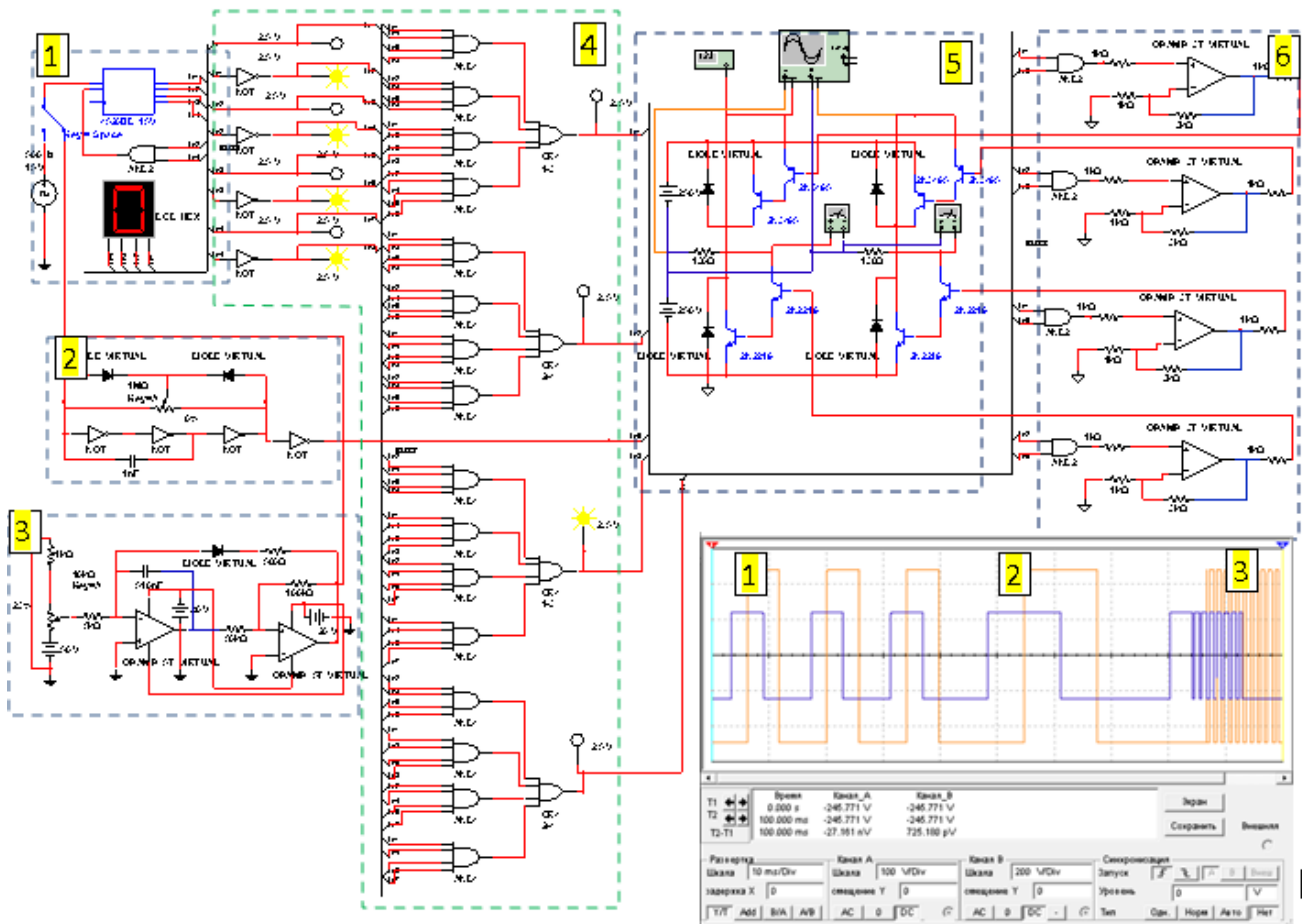
№ п.	x3	x2	x1	x0	T1	T2	T3	T4
0	0	0	0	0	0	0	1	0
1	0	0	0	1	1	0	1	0
2	0	0	1	0	1	0	0	0
3	0	0	1	1	1	1	0	0
4	0	1	0	0	1	1	0	0
5	0	1	0	1	0	1	0	0
6	0	1	1	0	0	1	0	1
7	0	1	1	1	0	0	0	1
8	1	0	0	0	0	0	1	1
9	1	0	0	1	0	0	1	1



a)

б)

Рисунок 3. Вхідна роздільна напівмостова реалізація, де а – діаграма перемикачів, б – схема ланки перетворення із подвійним живленням



a)

б)

— рабоча, канал А, масштаб 100 В / Діл., — пускова обмотки, канал В, масштаб 200 В / Діл.;  
 1 – частота 72 Гц; 2 – частота 31 Гц; 3 – частота 31 Гц із зниженою напругою.

Рисунок 4. Модель та результати досліджень системи з подвійним джерелом живлення

Рациональність системи з точки зору мінімуму елементів очевидна. Характеристики роботи аналогічні попередній схемі. На жаль, наявність двох джерел живлення не завжди може бути застосована.

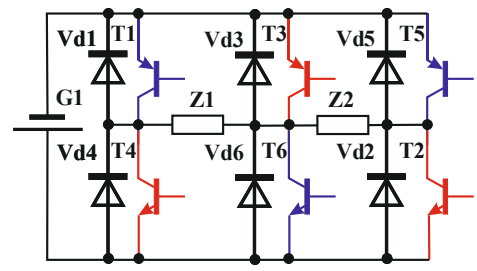
Найбільш раціональною, на думку авторів, є схема трифазної мостової реалізації із діаграмою керування за 180° градусним вмиканням ключів (рис.5), яка передбачає одночасну роботу трьох транзисторів. Власне, такий спосіб управління дозволяє отримати роботу інвертора із усіма перевагами, що притаманні двом попереднім схемним реалізаціям.

Важливим моментом проектування розподільників імпульсів є встановлення бажаної частоти тактових імпульсів, що подаються на вхід лічильника задання початкових керуючих сигналів. Зважаючи на

те, що бажана максимальна частота перетворення повинна коливатися у межах 0...50 Гц, а перші дві діаграми потребують максимального модуля рахунку 10, то у цьому випадку тактова частота генератора імпульсів керування повинна бути не менше 500 Гц. У випадку схеми рис.5, б) тактова частота для отримання бажаної частоти на виході перетворювача повинна становити не менше 300 Гц.

Модель та результати випробувань схеми рис.5, б) мають вигляд зображений на рис.6, 7. Форми отриманих напруг (рис.7) теж задовольняють принципу роботи однофазної асинхронної машини. При цьому ця схема має раціональну кількість елементів та відносно просту спосіб керування.

№ г	x2	x1	x0	T1	T2	T3	T4	T5	T6
0	0	0	0	1	0	0	0	1	1
1	0	0	1	1	1	0	0	0	1
2	0	1	0	1	1	1	0	0	0
3	0	1	1	0	1	1	1	0	0
4	1	0	0	0	0	1	1	1	0
5	1	0	1	0	0	0	1	1	1



а)

б)

Рисунок 5. Вхідна трифазна мостова схема перетворення, де а – діаграма, б – схема силової ланки

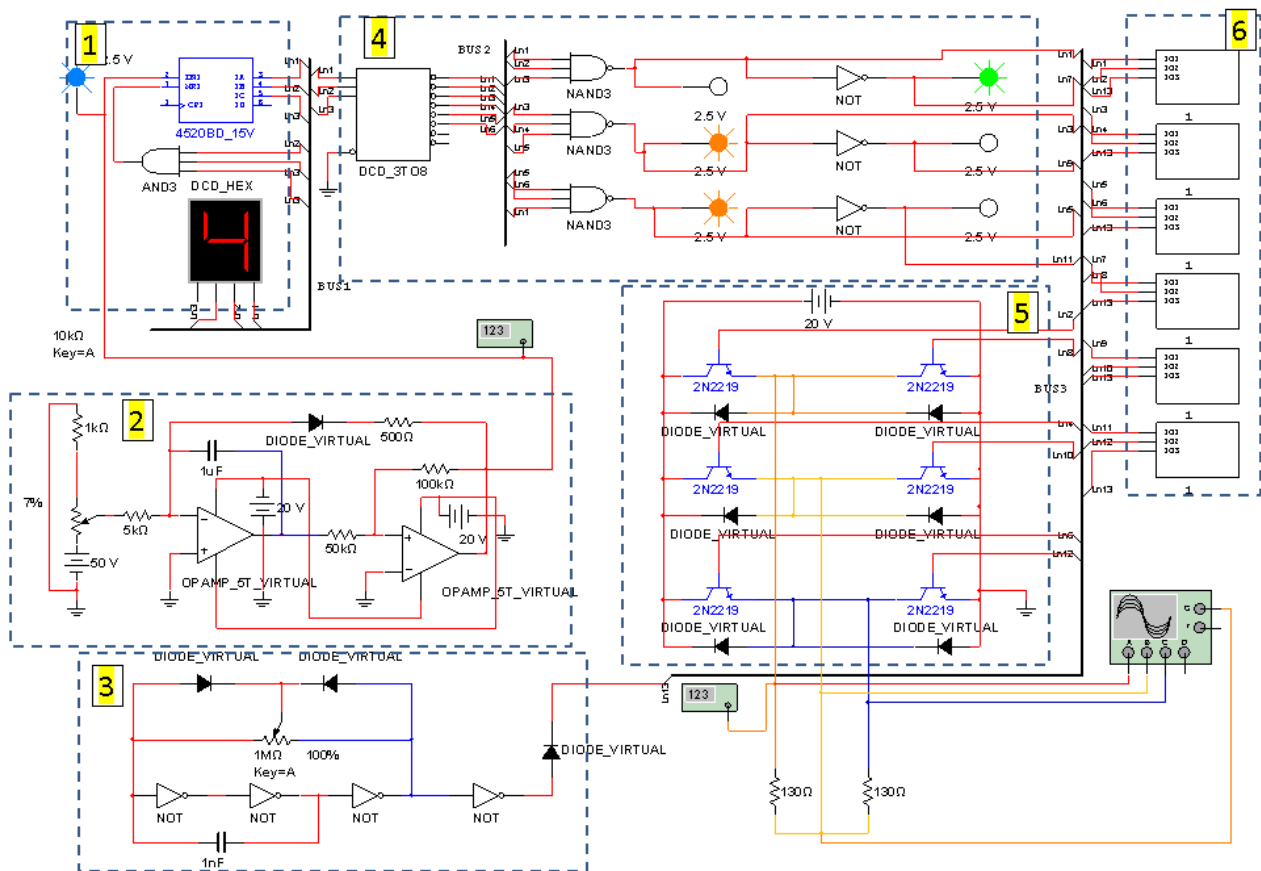
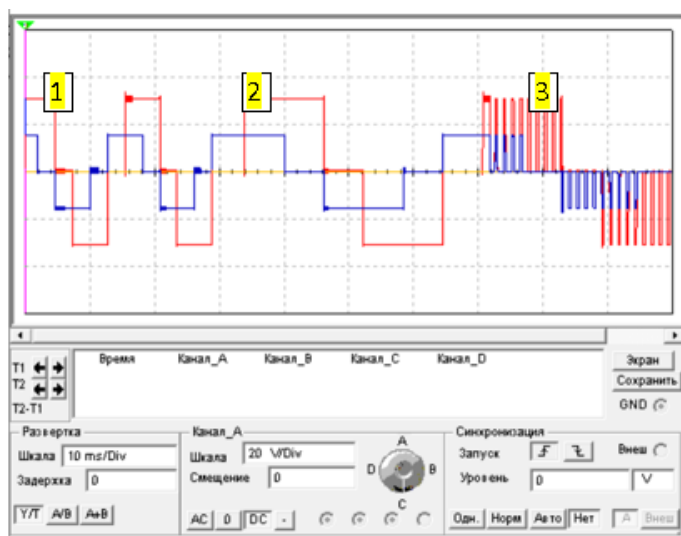


Рисунок 6. Трифазна мостова реалізація моделі





— Напряга на робочій обмотці, канал А, масштаб 10 В / Діл;

— Напряга на пусковій обмотці, канал В, масштаб 20 В / Діл.

1 – частота 72 Гц;

2 – частота 31 Гц;

3 – частота 31 Гц із зниженою напругою.

Рисунок 7. Результати моделювання

## ВИСНОВКИ

Аналіз запропонованого ряду топологій систем автономних перетворювачів напруги та частоти для однофазних асинхронних двигунів дозволяє зробити наступні висновки:

- Роздільна система живлення, побудована на двох окремих інверторах, дає добрий результат управління однофазним АД але за наявності надлишкової кількості елементів силового блоку, що ускладнює систему керування з одного боку, а з іншого, – стає підставою для зростання її вартості;

- Роздільна система, яка будується на напівмостових схемах силової ланки, має переваги по відношенню до попередньої реалізації, хоча у цьому випадку є потреба живлення від джерела подвійного типу;

- Трифазна система є найбільш раціональною з точки зору кількісного складу елементного вмісту схеми, універсальності способу керування для однофазної і трифазної асинхронної машини, що дозволяє уніфікувати такі інвертори на усі можливі випадки використання;

- Проведений аналіз різних топологій використання силових ланок автономних інверторів може стати відправною точкою для створення методичного забезпечення вивчення курсу «Силові перетворювачі автоматизованих електроприводів».

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

[1] Бородай В.А., Ковальов О.Р. Моделювання систем імпульсно-фазового керування перетворювальних приладів // Семінар Наукової Ради з проблем «Наукові основи електроенергетики». – К. :

Інститут електродинаміки, 2019. – С. 11.

[2] Бородай В.А., Ковалев А.Р. Моделирование систем импульсно-фазового управления преобразовательных устройств // Гірн. Електромеханіка та автоматика: Наук. – техн. зб. – 2015. – Вип. 94. – С. 64-69.

[3] Бородай В.А., Ковалев А.Р. Широко-импульсний регулятор с координатно-фазовым управлением скважности // Гірн. Електромеханіка та автоматика: Наук. – техн. зб. – 2015. – Вип. 95. – С. 54-58.

[4] Електротехнічні пристрої систем автоматичного управління технологічними процесами: навч. посіб. посібник для студентів галузі знань 15 – «Автоматизація та приладобудування» спеціальності 151 – «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / В.П. Грудська, В.І. Чибеліс / КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 5 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 107 с.

[5] Осташевський М.О. Електричні машини і трансформатори: навч. посібник / М.О. Осташевський, О.Ю. Юр'єв; за ред. д-ра техн. наук, професора В.І Міліх. - Київ: Каравела, 2018. - 452 с.

[6] Berdiev U.T., Khasanov F.F.O., Kutbidinov O.M.O. Uxiliary electric drive with asynchronous motor from a three-phase autonomous voltage inverter / U.T. Berdiev, F.F.O. Khasanov, O.M.O. Kutbidinov // Materials of conference «Innovative approaches, problems, Proposals and solutions in science and education». Tashkent state transport university.

Tashkent. - 2022. - №1. - P. 50-55.

- [7] Shahriar Muttalib Z.M., Ferdous S.M., Mortuza Saleque A., Chowdhury Md. M. Design and simulation of an inverter with high frequency sinusoidal pwm switching technique for harmonic reduction in a standalone / Z.M.Shahriar Muttalib, S.M. Ferdous, A.Mortuza Saleque, Md. M. Chowdhury // Utility Grid Synchronized Photovoltaic System. 2012 International Conference on Informatics, Electronics & Vision (ICIEV), Dhaka, Bangladesh. – 2012. – P. 1168-1173.  
DOI: 10.1109/ICIEV.2012.63175 33
- [8] Olarinoye G.A., Oricha J.Y. PWM inverter drive for modified single phase induction motors / G.A. Olarinoye, J.Y. Oricha // FUOYE Journal of Engineering and Technology, 2017. - Volume 2, Issue 2, P. 83-89.
- [9] Srivastava A., Tripathi S. Current source inverter fed induction motor drives: A survey / A.Srivastava, S. Tripathi // International Journal of Electrical Systems (IJES). – 2011. – Vol. 1, No. 1, June. - P. 14-27.
- [10] Sunter, S., Ozdemir, M., & Gumus, B. Modelling and simulation of single-phase induction motor with adjustable switched capacitor / S. Sunter, M. Ozdemir, B. Gumus // Proceedings of the 9th International Conference on Power Electronics and Motion Control. – 2000. - P. 5-1 – 5-5.
- [11] Shneen S.W., Abdullah F.N., Shaker D.H. / S.W. Shneen, F.N. Abdullah, D.H. Shaker Simulation model of single phase PWM inverter by using MATLAB/SIMULINK // International Journal of Power Electronics and Drive Systems. – 2021. - Vol. 12, No. 1, P. 212-216.
- [12] Hamid, M.B. New method for speed control of single phase induction motor with improved motor performance / M.B. Hamid // Energy Conversion and Management. – 2001. – Vol. 42. - No. 8. - P. 941-950.
- [13] Darbali-Zamora R., Merced D., Diaz-Castillo A., Ortiz-Rivera E. Single phase induction motor alternate start-up and speed control method for renewable energy applications / R. Darbali-Zamora, D. Merced, A. Diaz-Castillo, E. Ortiz-Rivera // Conference: 2014 International Conference on Renewable Energy Research and Application . - 2015. – P.743-748.
- [14] Halina T. et al. Modeling electromechanical characteristics of three-phase motors with inverters vector-algorithmic type in Matlab Simulink environment/ T.Halina // Procedia Eng. – 2016. - vol. 165.
- [15] Шуруб Ю.В. Трифазно-однофазний асинхронний електропривод з багатоелементним ємнісним фазозміщуючим модулем / Ю.В. Шуруб // Електротехніка і електромеханіка. - 2011, №3. – С. 49-50.
- [16] Шуруб Ю.В. Оптимізація трифазно-однофазних асинхронних електроприводів з ємнісними багатоелементними фазозміщуючими модулями змінної структури / Ю.В. Шуруб // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб.наук.пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2008. Вип. 20. – С. 39-40.

Стаття надійшла до редакції 07.09.2023

## SIMULATION OF AUTONOMOUS VOLTAGE INVERTERS OF POWER SOURCES OF SINGLE-PHASE ASYNCHRONOUS DRIVES

- BORODAI V.A. Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electric Drive, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: borodai.v.a@nmu.one;
- NESTEROVA O.YU. PhD, Associate Professor of, Head of the Department of Philosophy and Pedagogy, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: nesterova.o.yu@nmu.one.
- BOROVYK R.O. Engineer, Senior Lecturer of the Department of Electric Drive, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: borovyk.r.o@nmu.one;
- FEDOROV S.I. Engineer, Senior Lecturer of the Department of Electrical Engineering, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: fedorov.s.i@nmu.one;

**Purpose.** Development of original models of voltage inverters adapted to control a single-phase asynchronous motor with the subsequent prospect of creating automatic systems for improving the energy efficiency of household mechanisms, as well as developing educational complexes for studying the operation of frequency converters to form skills for their repair and tuning.

**Methodology.** The provisions of the theory of electric machines, methods of synthesis of digital control systems, methods and methods of modeling in CAD electronic laboratory of the company NATIONAL INSTRUMENTS of the Multisim component, methods of circuit design were used for conducting research.

**Findings.** Models of pulse distributors were developed and built for the cases of power supply of single-phase asynchronous motors with bridge inverters of separate and individual starting and working windings, half-bridge inverters with a bipolar power source and a three-phase inverter with control according to a 180-degree control diagram. Time diagrams of visual confirmation of the system's performance according to the declared principles have been obtained.



**Originality.** A number of original switch diagrams of the power section of the models of impulse distributors of autonomous voltage inverters are proposed, taking into account the phase shift and the duration of the switching pauses of the switching arms of the power unit to avoid emergency modes, recommendations are given on the levels of generation frequencies that are fed to the input of the combinational circuit, the prospect of using this system as part of a single-phase asynchronous electric drive with the possibility of energy-efficient control is shown.

**Practical value.** The proposed original model solutions for autonomous voltage inverters, which are adapted to work together with a single-phase IM, can be useful for developers of converter technology and become visual material for their use in the educational process for training specialists in specialty 141 "Electric power engineering, electrical engineering and electromechanics".

**Keywords:** simulation, autonomous voltage inverter, topology of the power section, pulse distributor, single-phase asynchronous motor.

## REFERENCES

- [1] Borodai, V.A., Kovalev, O.R. (2019). Modeljuvannja system impul'sno-fazovogo ke-ruvannja peretvorjuval'nyh prykladiv [Modeling of pulse-phase control systems of converting devices]. Seminar of the Scientific Council on the problems "Scientific foundations of electric power engineering, Institute of Electrodynamics, 11. (in Ukrainian).
- [2] Borodai, V.A., Kovalev, O.R. (2015). Modelirovanie sistem impul'sno-fazovogo upravlenija preobrazovatel'nyh ustrojstv [Modeling of systems of pulse-phase control of converting devices]. Hirn. Electromechanics and automation, 94, 64-69. (in Ukrainian).
- [3] Borodai, V.A., Kovalev, O.R. (2015). Shirotno-impul'snyj reguljator s koordinat-no-fazovym upravleniem skvazhnosti [Pulse-width controller with coordinate-phase duty cycle control]. Hirn. Electromechanics and automation, 95, 54-58. (in Ukrainian).
- [4] Grudska, V.P., Chibelis, V.I. (2021). Elektrotehnicni prystroi' system avtomatichnogo upravlinnja tehnologichnymy procesamy: navch. posib. posibnyk dlja studentiv galuzi znan' 15 – «Avtomatyzacija ta prykladobuduvannja» special'nosti 151 – «Avtomatyzacija ta komp'juterno-integrovani tehnologii» [Electrotechnical devices of systems of automatic control of technological processes: training. manual a guide for students of the field of knowledge 15 - "Automation and instrument engineering" specialty 151 - "Automation and computer-integrated technologies"]. Kyiv, KPI named after Igor Sikorsky, 107. (in Ukrainian).
- [5] Ostashevs'kyj, M.O., O.Ju., Jur'jev (2018). Elektrychni mashyny i transformatory: navch. Posibnyk [Electric machines and transformers: training. Manual]. Kyiv, Caravela, 452. (in Ukrainian).
- [6] Berdiev, U. T., Khasanov, F. F., Kutbidinov, O. M. (2022). Vspomogatel'nyj jelektroprivod s asinhronnym dvigatelem ot trehfaznogo avtonomnogo preobrazovatelja naprjazhenija [Auxiliary electric drive with an asynchronous motor from a three-phase autonomous voltage converter]. GIAB. 1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/auxiliary-electric-drive-with-asynchronous-motor-from-a-three-phase-autonomous-voltage-inverter> (date of the application: 23.07.2023). (in Uzbekistan).
- [7] Shahriar, Z.M., Muttalib, S. M., Ferdous, Mortuza, A., Saleque and Md. M. Chowdhury (2012). "Design and Simulation of an Inverter with High Frequency Sinusoidal PWM Switching Technique for Harmonic Reduction in a Standalone / Utility Grid Synchronized Photovoltaic System". Int. Conf. Inf. Electronics & Vision. 1168-1173, 2012. DOI: 10.1109/ICIEV.2012.63175 33
- [8] Olarinoye, Gbenga & Oricha, Joseph. (2017). PWM Inverter Drive for Modified Single Phase Induction Motors. FUOYE Journal of Engineering and Technology. 2. 10.46792 / fuoyejet.v2i2.147.
- [9] K. Srivastava, S. M. Tripathi "Current Source Inverter fed Induction Motor Drives: A Survey" International Journal of Electrical Systems (IJES).
- [10] Sunter, Sedat & Ozdemir, Mehmet & Gumus, Bilal. (2000). Modeling and Simulation of A Single Phase Induction Motor with Adjustable Switched Capacitor. 5-1.
- [11] Shneen, Salam & Abdullah, Nabeel & Harith, Dina. (2020). Simulation Model of Single Phase PWM Inby using Matlab. International Journal of Power Electronics and Drive Systems. Vol. 12, No. 1, Mar 2021, pp. 212-216.
- [12] Hamid, M.B. (2001). New method for speed control of single phase induction motor with improved motor performance . Energy Conversion and Management. - Vol. 42, No. 8, P. 941-950.
- [13] Darbali-Zamora, Rachid & Merced, Daniel & Díaz-Castillo, Andrés & Ortiz-Rivera, Eduardo. (2015). Single phase induction motor alternate start-up and speed control method for renewable energy applications. Conference: 2014 International Conference on Renewable Energy Research and Application, pp. 743-748. 10.1109/ICRERA.2014.7016484.
- [14] Halina, T., (2016). Modeling electromechanical characteristics of three-phase motors with inverters vector-algorithmic type in Matlab Simulink environment, Procedia Eng., vol. 165.
- [15] Shurub, Yu.V. (2011). Vybor asinhronnogo dviga-

telja privoda ventiljatora teplovoza s usloviem obe-  
spechenija ego ustojchivoj raboty [Three-phase-  
single-phase asynchronous electric drive with a  
multi-element capacitive phase-shifting module].  
Electrical engineering and electromechanics, 3, 49-  
50. (in Ukrainian).

[16] Shurub, Yu.V. (2008). Optymizacija tryfazno-  
odnofaznyh asynhronnyh elektroprivodiv z jemnis-  
nymy bagatoelementny-my fazozmishhujuchymy

moduljamy zminnoi' struk-tury [Optimization of  
three-phase-single-phase asynchronous electric drives  
with capacitive multi-element phase-shifting modules  
of variable structure] Pr. Institute of Electrodynamics  
of the National Academy of Sciences of Ukraine,  
College of Science - K.: IED of the National Acad-  
emy of Sciences of the National Academy of Sci-  
ences, 20, 39-40. (in Ukrainian).

## SPECTRAL METHOD OF ELECTRICAL CIRCUITS ACCELERATED SIMULATION WITH THYRISTORS

- TYKHOVOD S.M. Dr. Sc. (Tech.), Associate Professor, Professor of the Electrical Machines Department, National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: stikhovod@gmail.com;
- DYVCHUK T.YE. PhD, Associate Professor of the Electrical Machines Department, National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: tetiana.divchuk@gmail.com;
- SOLODOVNIKOVA T.P. Senior teacher of the Electrical Machines Department, National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: solodovtp@gmail.com;
- SYTIK O.V. Senior teacher of the Electrical Machines Department, National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: elenasytik83@gmail.com

**Purpose.** The development of transient processes calculation method in electric circuits with thyristors based on the use of functions approximation by orthogonal polynomials.

**Methodology.** Functions approximation by orthogonal polynomials, numerical methods of differential equations integration, matrix methods, programming, theory of electric circuits.

**Obtained results.** The method of solution function polynomial approximation of integro-differential equations of state, which describes the transient processes of an electric circuit with thyristors, is used in this paper. The used method showed the advantages over other known methods in increasing the accuracy and reducing the simulation time of transient electrical processes by more than 6 times.

**Findings.** The solution is approximated by a series of Chebyshev polynomials. The integro-differential equations of state are transformed into linear algebraic equations for special depiction of the solution functions. The depiction of functions of true currents in the equivalent circuit is interpreted as direct currents. Such a schematic model creates visibility for a researcher performing simulation of transient electrical processes.

**Practical value.** The proposed methods discover the possibility of using the apparatus of direct current electric circuits' theory for transient processes in complex schemes modeling with thyristors.

**Key words:** electric circuits; orthogonal polynomials; differential equations; numerical methods; spectral methods; approximation; Chebyshev polynomials; transient processes; schematic model.

### I. INTRODUCTION

Many papers [1], [2] have been devoted to the problems of complex electrical circuits modeling with thyristors. Back in the 1980s, a number of universal models of converting devices, oriented to ES series PC, were developed. Therefore, the developed models had a very complex algorithm. Modern computers have much better resources, which are preferably to use. Mathematic numerical methods have also been developed at a rapid pace. The method proposed in this paper can significantly increase the simulation speed. The method of differential equations numerical solution based on the use of orthogonal polynomials is used.

### II. ANALYSIS OF RESEARCH AND PUBLICATION

The paper [3] shows the use of orthogonal polynomials for the differential equations integration. The author calls the method of functions decomposition into series by orthogonal polynomials the spectral method in this paper. An analogy of functions decomposition into a Fourier

series by trigonometric functions is used, where the set of decomposition coefficients is a frequency spectrum. The paper presents studies of the convergence rate of series. The author considers the terms "interpolation" and "collocation" to be identical, but the term interpolation is used to represent a known function, and the term "collocation" is used when decomposing a function, obtained as a result of solving a differential equation, into a series. The paper [4] gives the basics of the spectral method using Chebyshev polynomials for the integration of differential equations and shows the advantages of this method over the finite difference method. The paper [5] presents basics of the spectral method. Chebyshev and Legendre polynomials are considered as basic functions. The application of the method to the solution of ordinary differential equations is shown.

In paper [6], the fundamentals of the spectral method for solving equations in partial derivative problems of hydrodynamics are investigated. The better efficiency of this method compared to finite difference methods is noted. Paper [7] also outlines the basics of the spectral

method for solving partial differential equations. The presentation is performed without unnecessary abstract mathematics and details. The author tries to show that spectral methods do not have great complexity, as some experts believe. The authors of [8] claim that the spectral methods are the best for solving ordinary differential equations with high accuracy, provided that the data defining the task is smooth. At the same time, it is possible to achieve a high accuracy, when the method of finite differences or finite elements gives two or three signs. Spectral methods require less computer memory comparing to alternative methods.

The solution approximation for the current function in an electric circuit by series in Chebyshev polynomials is used in paper [9]. The transient process in the electric circuit is investigated. The transformation of the integro-differential equation of state into an algebraic equation for currents depiction is shown. Kirchhoff's laws for currents depiction are proven. As a result, a method allowing significant increase of simulation speed is obtained.

A study of transient processes calculation methods in linear electric circuits based on the use of orthogonal polynomials is performed in paper [10], [11]. Based on the proposed methods, a program has been developed [12].

A computer program for magnetic electric circuits with thyristors simulation has been developed by authors [13]. The program uses Gere's numerical methods of ordinary differential equations integrating. Nonetheless, computer modeling is slow.

The orthogonal polynomials are successfully used to integrate differential equations. However, there are no publications showing the use of spectral methods for transient processes calculating in electric circuits with thyristors.

### III. FORMULATION OF THE WORK PURPOSE

The development of transient processes calculation method in electric circuits with thyristors based on the use of approximation of functions by orthogonal polynomials.

### IV. EXPOUNDING THE MAIN MATERIAL AND RESULTS ANALYSIS

In many cases, with an accuracy sufficient for practical calculations, the valves are modeled as variable resistive elements having a very small given resistance  $R_0$  in the open state and a very large given resistance  $R_z$  in the closed state.

The thyristor maintains its open state if the current through the thyristor is greater than zero and changes from open to closed if the current through the thyristor changes sign from positive to negative. If the thyristor is closed, it can be opened under the fulfillment of two conditions simultaneously: the current through the thyristor must be greater than zero and a positive control pulse is applied to the control electrode. Current time since the beginning of the last EMF period is:

$$t_p = t - \left[ \frac{t}{T_i} \right] \cdot T_i, \quad (1)$$

where  $t$  is the current time, and square brackets mean the operation of taking an integer part of a number.  $T_i$  is the pulse tracking period on the controlling electrode.

The moment of pulse delivery to the controlling electrode is determined by the condition:

$$t_p > a_i \cdot t \ \& \ \leq a_i \cdot t + t_i,$$

where  $t$  is the current time,  $a_i$  is the shift coefficient of the control pulse from the beginning of the EMF period.

Since the current time during simulation on the computer does not change continuously, but quantized with a step  $h$ , and the real controlling pulses have a finite duration, then it is necessary to verify the thyristor state and determine the value of its resistance  $R_{vs}$  at each integration step. Thyristor block-scheme of the thyristor state determination algorithm is given on the Figure 1. The Flag variable determines the state of the thyristor in the scheme. If Flag = 1, the thyristor is opened, if Flag = 0, the thyristor is closed.

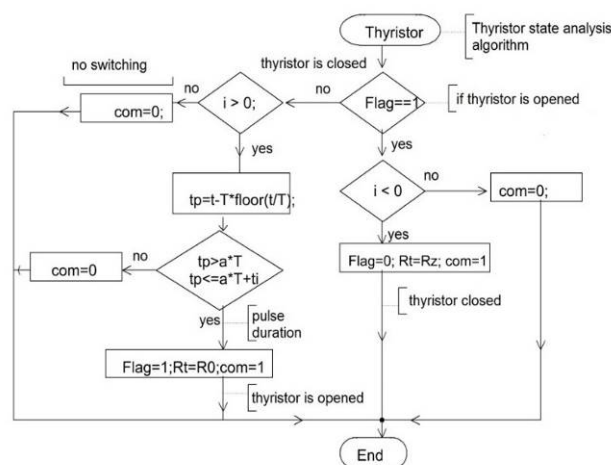


Figure 1. Block-scheme of the thyristor state determination algorithm

The numerical forecast-correction method is used in paper [9]. However, this method has resulted in significant simulation time for long processes modeling in complex electrical circuits.

A method of accelerated calculation of transient processes in linear electrical circuits is proposed in papers [6-7].

In these papers, when transient processes are calculated, an equivalent circuit for special depictions is used, which is consisted of the following principles:

- the integration time is not changed in steps, but in segments of length  $\tau$ , which contains several steps;
- in the equivalent circuit, the resistive element  $R$  has a resistance of  $R \cdot V$  and a source of constant EMF with

the value  $R \cdot i_0$  is turned on in series with it towards the current;

- inductive element  $L$  has resistance  $L \cdot D$ ;
- the capacitive element  $C=1/B$  has a resistance  $B \cdot S$  and a source of constant EMF with the value  $B\Delta i_0 + u_{C0}$  is turned on in series with it towards the current,
- inductive element  $L$  has resistance  $L \cdot D$ ;
- the capacitive element  $C=1/B$  has a resistance  $B \cdot S$  and a source of constant EMF with the value  $B\Delta i_0 + u_{C0}$  is turned on in series with it towards the current,

where  $\mathbf{V}$ ,  $\mathbf{D}$ ,  $\mathbf{S}$  are special matrices that are calculated based on the use of orthogonal polynomials,  $\Delta$  is a vector containing the position of reference points on the segment,  $i_0$  is the initial value of the current in the resistive element,  $u_{C0}$  is the initial value of the voltage on the capacitive element.

Currents depiction  $C_k$ , for which Kirchhoff's laws are valid, appears in equivalent circuits for special depictions, instead of real currents  $i_k(t)$ . Depictions can be assumed like as currents. Depictions can be calculated on the basis of algebraic equations based on Kirchhoff's laws. The depiction of the currents  $C_k$  contains coefficient values of the current functions decomposition  $i_k(t)$  by orthogonal polynomials for the  $\kappa$ -th wire. Knowing the current decomposition coefficients  $i_k(t)$  by polynomials and the value  $i_{k0}$  for branch  $k$ , we can obtain a vector of current values  $I_k$  at all nodal points of the segment  $\tau$ .

For example, consider the circuit on the Figure 2.

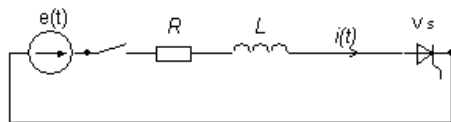


Figure 2. Circuit for simulation

The equivalent circuit for depictions is given on the Figure Figure. 3.

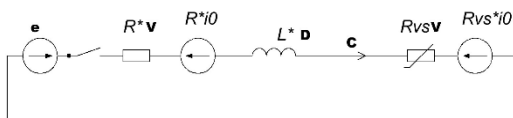


Figure 3. Equivalent circuits of the fig. 2. for depictions

The equation according to Kirchhoff's second law of the scheme on the Fig. 3 is:

$$(LD + (R + Rvs)V) \cdot C = e - (R + Rvs)i_0, \quad (2)$$

or

$$\mathbf{Z} \cdot \mathbf{C} = \mathbf{F}, \quad (3)$$

where

$$\mathbf{Z} = LD + (R + Rvs)V, \quad (4)$$

$$\mathbf{F} = e - (R + Rvs)i_0. \quad (5)$$

The solution to equation (3) has the is:

$$\mathbf{C} = \mathbf{Z}^{-1} \cdot \mathbf{F},$$

where  $\mathbf{Z}^{-1}$  denotes the operation of taking the inverse matrix.

The error of equation solving (2) depends on the segment length of the simulation time. Therefore, the total interval of the simulation time should be divided into several segments.

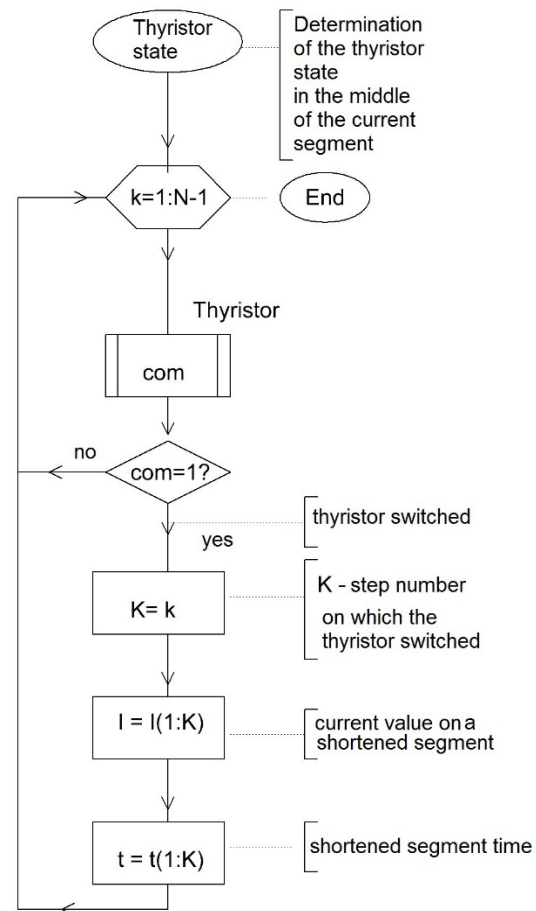


Figure 4. Block-scheme of the algorithm for determining the thyristor state on a shortened segment

The thyristor state can be changed in the middle of the segment. Therefore, the current segment must be shortened before the state changes. The block-scheme of the algorithm for determining the thyristor state on a shortened segment is given on the Figure 4.

The block-scheme of the simulation algorithm of electric current change in the circuit of the Figure 1 is given on the Figure 5.

The computer program has been compiled on the basis of the developed theory in the octave-8.2.0-w64 system. Simulation results with input data are as follows:

$E_m=100$  V;  $L=0.01$  H;  $R=1$  Ohm;  $T_i = 0.02$  c;  $t_i=0.01 \cdot T_i$ ;  $a_i=0.4$ ;  $f=50$  is given on the Figure 6. A computer program based on Geer's numerical method has been also developed. The calculation results coincide with an accuracy of 0.01%, but the calculation time has increased more than 6 times.

V. CONCLUSIONS

The proposed method of transient processes calculation in electric circuits allows to replace operations with instantaneous values of currents into operations with constant currents in a special equivalent circuit. This approach allows reducing the calculation time significantly, what is important for the large schemes and long transient processes. In previous publications, this method has been successfully applied to continuous transients only. This paper shows the use of the proposed method in electric circuits that contain key elements thyristors.

REFERENCE

- [1] Zhuikov V.Ya and others. (1988) Automated design of power electronic circuits
- [2] Yagup V.G. (1968) Automated design of thyristor circuits
- [3] Boyd, J. P. (2001). Chebyshev and Fourier spectral methods. Courier Corporation.
- [4] Epperson, James F., (2013). An introduction to numerical methods and analysis / James F. Epperson, Mathematical Reviews. ISBN 978-1-118-36759-9
- [5] Gourgoulhon, E., Bonazzola, S., Grandclément, P., Marck, J. A., & Novak, J. (2002, September). Introduction to spectral methods. In 4th EU Network meeting, Palma de Mallorca (Vol. 175, p. 176).
- [6] Costa, B. (2004). Spectral Methods for Partial Differential Equations. CUBO, A Mathematical Journal, 6(4), 1–32. Retrieved from <https://cubo.ufro.cl/ojs/index.php/cubo/article/view/1552>
- [7] Kopriva, D. A. (2009). Implementing spectral methods for partial differential equations: Algorithms for scientists and engineers. Springer Science & Business Media.
- [8] Trefethen, L. N. (2000). Spectral methods in MATLAB. Society for industrial and applied mathematics.
- [9] Tykhovod, S., & Patalakh, D. (2019, September). Calculation of Transients in Electrical Circuits at the Use of Solution Approximation by Tchebyshev's Polynomials. In 2019 IEEE 20th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE) (pp. 1-4). IEEE. DOI: <https://doi.org/10.1109/CPEE47179.2019.8949129>
- [10] Boyd, J. P., & Patschek, R. (2014). The relationships between Chebyshev, Legendre and Jacobi polynomials: the generic superiority of Chebyshev polynomials and three important exceptions. Journal of Scientific Computing, 59, 1-27. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10915-013-9751-7>
- [11] Tykhovod, S., & Orlovskiy, I. (2022). Development and Research of Method in the Calculation of Transients in Electrical Circuits Based on Polynomials. Energies, 15(22), 8550. DOI:

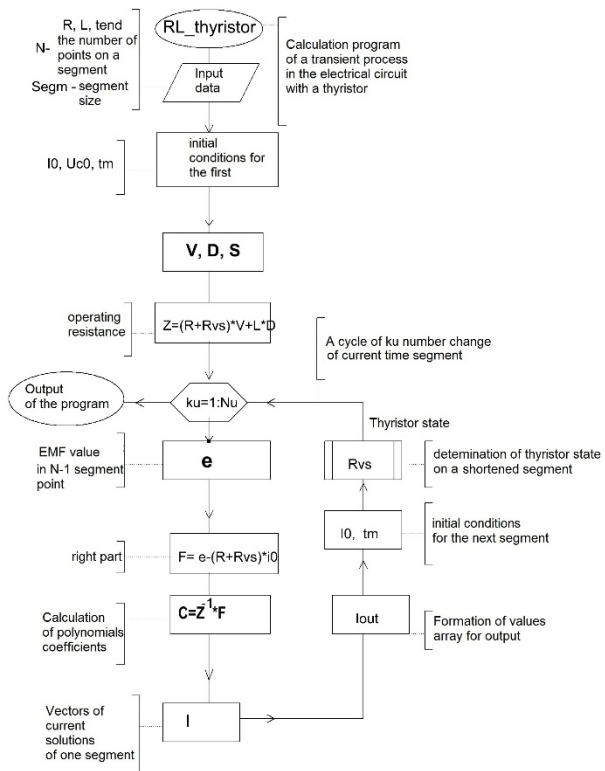


Figure 5. Block-scheme of the simulation algorithm of electric current change in the circuit of the Figure 1

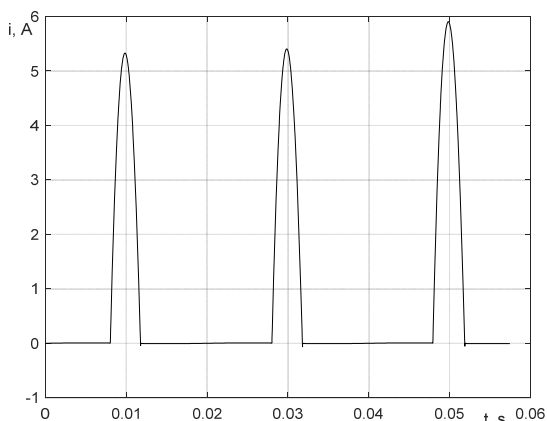


Figure 6. Time dependence of current obtained as a result of simulation



<https://doi.org/10.3390/en15228550>

[12] Program for calculating the transient process by the special method in the RLc circuit. Retrieved from: [https://drive.google.com/file/d/1PVHWp9caGdHy\\_L8AMR39VTtogw0ylcGY/view?usp=sharing](https://drive.google.com/file/d/1PVHWp9caGdHy_L8AMR39VTtogw0ylcGY/view?usp=sharing)

[13] Tykhovod S.M., Afanasieva I.O., Kornus T.M. (2009) Development of a computer program for the simulation of magnetolectric circuits with thyristors. Technical electro-dynamics. 3(9-14)

[14] Tykhovod S.M. (2000) Methodology for computer simulation of electrical circuits containing semiconductor valves. Electrical engineering and power engineering. 2(50-52).

Стаття надійшла до редакції 19.09.2023

## СПЕКТРАЛЬНИЙ МЕТОД ПРИСКОРЕНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ ЩО МІСТЯТЬ ТИРИСТОРИ

ТИХОВОД С.М.

д-р техн. наук, доцент, професор кафедри електричних машин, Національний університет «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: stikhovod@gmail.com;

ДІВЧУК Т.Є.

канд. техн. наук, доцент кафедри електричних машин, Національний університет «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: tetiana.divchuk@gmail.com;

СОЛОДОВНИКОВА Т.П.

старший викладач кафедри електричних машин, Національний університет «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: solodovtp@gmail.com;

СИТІК О.В.

старший викладач кафедри електричних машин, Національний університет «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: elenasytik83@gmail.com

**Мета роботи.** Розробка методу розрахунку перехідних процесів в електричних колах з тиристорами на основі використання апроксимації функцій ортогональними поліномами.

**Методи дослідження.** Апроксимація функцій ортогональними поліномами, числові методи інтегрування диференціальних рівнянь, матричні методи, програмування, теорія електричних кіл.

**Отримані результати.** У роботі використаний метод поліноміальної апроксимації функції розв'язку інтегро-диференціальних рівнянь стану, які описує перехідні процеси електричного кола, що містить тиристори. використаний метод показав переваги перед іншими відомими методами у підвищенні точності та зниженні часу моделювання перехідних електричних процесів більш, ніж у 6 разів.

**Наукова новизна.** Рішення апроксимуються рядом по поліномах Чебишова. інтегро-диференціальні рівняння стану перетворюються на лінійні алгебраїчні рівняння для спеціальних зображень функцій рішення. у схемі заміщення зображення функцій істинних струмів інтерпретуються як постійні струми. така схемна модель створює наочність досліднику, що виконує моделювання перехідних електричних процесів.

**Практична цінність.** Запропоновані методи відкривають можливість використання апарату теорії електричних кіл постійного струму для моделювання перехідних процесів у складних схемах, що містять тиристори.

**Ключові слова:** електричні кола; ортогональні поліноми; диференціальні рівняння; числові методи; спектральні методи; апроксимація; поліноми Чебишова; перехідні процеси; схемна модель

УДК 621.313.84

## ОЦІНКА ПАРАМЕТРІВ МАГНІТНОГО РЕДУКТОРА ДЛЯ АВТОНОМНОЇ ВІТРОУСТАНОВКИ ПРИ ЗМІНІ ШВИДКОСТІ ВІТРУ

- КОВАЛЕНКО М.А. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електромеханіки національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” Київ, Україна, e-mail: kovalenko\_ma@i.ua;
- ЧУМАК В.В. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електромеханіки національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” Київ, Україна, e-mail: chumack\_kri@ukr.net;
- КОВАЛЕНКО І.Я. асистент кафедри відновлювальних джерел енергії національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” Київ, Україна, e-mail: 2048141@ukr.net;
- ТКАЧУК І.В. аспірант кафедри електромеханіки національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” Київ, Україна, e-mail: baja0073@gmail.com;
- ХАРФОРД А.Г. аспірант кафедри електротехнічних пристроїв та електротехнологічних комплексів національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” Київ, Україна, e-mail: mojaverocketman@gmail.com.

**Мета роботи.** Провести оцінку параметрів та характеристик магнітного редуктора при постійній та змінній швидкості вітру у складі автономної вітроелектроустановки.

**Методи дослідження.** Аналіз існуючих методів математичного моделювання магнітних редукторів. Чисельні методи математичного моделювання на основі скінченних елементів. Чисельні методи обробки отриманих результатів.

**Отримані результати.** Розроблено двовимірну польову математичну модель для оцінки параметрів та характеристик магнітного редуктора при змінній та постійній швидкості вітру. За допомогою розробленої моделі проаналізовано електромагнітне поле, параметри та характеристики магнітного редуктора як при постійній, так і при змінній швидкості обертання. Зокрема, було виявлено, що магнітна система редуктора не досягає насичення, при цьому середні значення магнітної індукції в конструктивних елементах редуктора залишаються в межах допустимих значень для використовуваних матеріалів та марок сталі. Отримані дані про середні значення електромагнітних моментів зовнішнього (високошвидкісного) ротора та внутрішнього ротора дозволяють зрозуміти взаємозв'язок між ними та їх вплив на роботу системи. Зроблено висновок про нерівномірний розподіл індукції вздовж середньої лінії в повітряному проміжку, який зумовлений присутністю модулятора в конструкції редуктора. Крім того, відповідно до отриманих результатів, зміна швидкості вітру впливає на швидкість обертання магнітного редуктора та величини електромагнітних моментів високошвидкісного та низькошвидкісного роторів. Такі відомості допомагають зрозуміти динаміку роботи системи при різних умовах зовнішнього середовища. Отримані в дослідженні результати мають важливе значення для подальшого вдосконалення конструкції магнітного редуктора та забезпечення більш ефективної роботи вітроустановки малої потужності. Вони можуть бути використані для оптимізації конструкції та підвищення його продуктивності, що сприятиме розвитку вітроенергетики та зеленої енергетичній промисловості в цілому. Середнє значення електромагнітного моменту зовнішнього (високошвидкісного) ротора становить приблизно 7,4 Н·м, тоді як для внутрішнього ротора величина електромагнітного моменту складає близько 66 Н·м. Відношення моментів зовнішнього та внутрішнього роторів становить 8,92, що корелюється із коефіцієнтом редукції досліджуваного редуктора.

**Наукова новизна.** Розроблено двовимірну польову математичну модель, що враховує зміну параметрів та характеристик магнітного редуктора при зміні швидкості вітру та випадкової швидкості обертання ротора вітрогенератора.

**Практична цінність.** Результати дослідження магнітного редуктора для вітроустановки малої потужності мають важливий внесок у розвиток вітроенергетики, сприяють підвищенню ефективності та надійності виробництва енергії та сприяють створенню більш сталого та екологічно чистого енергетичного комплексу.

**Ключові слова:** магнітний редуктор, вітроустановка, польова математична модель, електромагнітне поле, оптимізація конструкції, вітроенергетика.



## I. ВСТУП

Системи, які перетворюють механічну енергію вітру в електричну, є актуальним науково-практичним напрямком. Одним з прикладів таких систем є вітроелектроустановки, які складаються з ротора вітроустановки, редуктора та електрогенератора. Ротор вітроелектроустановки має нелінійну характеристику з явно вираженими максимумами активної потужності при різних швидкостях вітру [1].

Вітроенергетика стала одним із найважливіших напрямків розвитку сталого та екологічно чистої енергетики. Вона спирається на використання вітрових турбін для перетворення кінетичної енергії вітру в електричну енергію. Одним із важливих компонентів у вітроустановках є магнітний редуктор, який забезпечує передачу енергії від вітрового колеса до електрогенератора.

Традиційні вітроелектроустановки з мультиплікатором і без нього працюють на різних точках механічної характеристики ротора вітроустановки при зміні навантаження та швидкості вітру [2]. Вітроелектроустановки з мультиплікатором використовують класичні електрогенератори з постійними магнітами та радіальним основним магнітним потоком, тоді як безмультиплікаторні системи використовують електрогенератори з осовим магнітним потоком, що мають ряд переваг.

Автори попередніх робіт провели чисельні моделювання вітроелектроустановки з генератором із постійними магнітами. За результатами цих моделювань виявлено високу ефективність використання підмагнічування додатковою ємністю обмотки якоря генератора та використання підмагнічування додатковою обмоткою магнітоелектричного генератора. Застосування додаткової ємності дозволяє збільшити вихідну активну потужність генератора на приблизно 7-16%. А ефект підвищення активної потужності генератора за рахунок підмагнічування додатковою обмоткою складає приблизно 32-35%. Однак, незважаючи на незаперечні переваги, які забезпечує використання зубчастих передач в технічних пристроях, вони мають ряд недоліків, таких як; високий рівень шуму, низьку надійність, необхідність мастила, необхідність у регулярних технічних оглядах, нестійкі до раптових поривчастих вітрів, а також мають низьку переважувальну здатність [3]. Крім того, під час швидкості вітру, що перевищує 12-14 м/с необхідно застосування спеціальних гальмівних пристроїв, щоб забезпечити механічний редуктор від виходу з ладу [4].

Перспективним є використання магнітних редукторів [5]. Вони дозволяють відмовитись від механічного редуктора на користь магнітного редуктора і використовувати на вихідному валі вітроустановки класичний високошвидкісний та більш компактний електрогенератор.

## II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Електричні машини, включені в серію з механічними редукторами, широко використовуються для виробництва економічно ефективних і легких рішень трансмісії, для застосувань, у яких потрібний високий крутний момент на низькій швидкості, наприклад у вітрових турбінах [6]. Компонент редуктора передає низькошвидкісний високий крутний момент у вихідний високошвидкісний (HS) з низьким крутним моментом і, таким чином, дозволяє значно зменшити розмір порівняно з рішеннями з прямим приводом. Механічні редуктори часто використовуються для цієї мети, однак вони схильні до невід'ємних проблем, таких як пошкодження в ситуації перевантаження, шум, періодичне змашування та складне технічне обслуговування. Проблеми, пов'язані з надійністю та вартістю з їх несправністю, створили топології трансмісії, які повністю виключають механічні редуктори або зменшують їх складність за рахунок зменшення кількості редукторів.

Магнітний редуктор - це механізм, який використовує магнітне поле для передачі обертального моменту між двома валами з різними швидкостями обертання. Він забезпечує зменшення швидкості обертання та збільшення обертового моменту від вітрового колеса до електрогенератора, що дозволяє ефектніше генерувати електричну енергію [9], [10]. Магнітний редуктор складається з двох основних складових - зовнішнього та внутрішнього роторів, які містять постійні магніти. Зовнішній ротор пов'язаний з вітровим колесом, тоді як внутрішній ротор пов'язаний з електрогенератором. Між роторами створюється магнітне поле, яке передає обертальний момент від зовнішнього ротора до внутрішнього.

Магнітні редуктори (MG) можуть запропонувати привабливу альтернативу механічним редукторам і останнім часом викликають підвищений інтерес як з боку промисловості, так і з боку досліджень [7], [8]. Топологія MG, здатна мати високу щільність крутного моменту, була досліджена в [9], [10], [11]. Він демонструє безконтактну передачу крутного моменту, властивий захист від перевантаження, надлишкове змашування зачеплення та знижену механічну вібрацію, тому має потенціал для подолання проблем, пов'язаних з механічними редукторами. MG також можна механічно та магнітно інтегрувати з машиною з постійними магнітами (PM), тим самим зменшуючи кількість ступенів механічного редуктора або повністю виключаючи редуктор [12]. Інтегровані PM-машини MG також здатні демонструвати щільність крутного моменту, більшу, ніж еквівалентні машини з прямим приводом PM з радіальним полем, і, отже, можуть дозволити реалізувати легкі та економічно ефективні рішення для приводу вітрових турбін [13].

Магнітна передача має малу в порівнянні з зубчастими передачами торсіонну жорсткість, являючи собою пружний елемент, що негативно позначається

на динамічних характеристиках. Для збільшення торсійної жорсткості магнітної передачі [14] запропоновано технічне рішення, згідно з яким циліндрична магнітна передача складається з двох ступенів, які зміщені один щодо одного на певний кут.

Для проектування коаксіальних планетарних магнітних передач зазвичай використовується два підходи до розрахунку властивостей магнітного поля – аналітичний і чисельний. Історично першим з них з'явився аналітичний метод розрахунку у двовірному наближенні [10], [11], застосування якого передбачало прийняття низки припущень. Основні з них - це лінійність магнітних властивостей матеріалів, еквівалентність поверхонь зубцевих елементів, нехтуванням до кінцевих ефектів і дотичної складової магнітного поля в повітряних зазорах.

Основним недоліком сучасних аналітичних методів є низька точність розрахунку, обумовлена принциповою неможливістю точного обліку нелінійності властивостей магнітних матеріалів, що може призводити до виникнення похибки у визначенні амплітуди робочої гармоніки магнітного поля до 40% [12], змушуючи проектувати магнітну таким чином, щоб елементи залишалися на лінійній ділянці основної кривої намагнічування [14]. Для досягнення максимальної густини моменту в коаксіальній планетарній магнітній передачі необхідно, щоб окремі сегменти модулятора знаходилися в насиченому стані, в результаті чого цей недолік принципово не дозволяє спроектувати максимально ефективний пристрій.

До переваг аналітичних методів розрахунку можна віднести значно менший у порівнянні з чисельними методами час розрахунку [13].

Другий підхід до розрахунку магнітного поля базується на чисельному розв'язанні диференціальних рівнянь Максвелла і дозволяє вводити мінімальну кількість припущень і цим отримувати результат з високим ступенем точності. Найбільш поширеними методами розв'язання цих диференціальних рівнянь є метод кінцевих елементів та метод просторових інтегральних рівнянь. Розрахунок магнітних передач за допомогою чисельних методів із постановкою завдання у тривимірному наближенні дозволяє отримати точність при розрахунку електромагнітного моменту до 5% [7], [10], а також дає можливість більш точно враховувати магнітні втрати.

Узагальнюючи результати літературного пошуку можливо зробити висновок, що основна мета наукових досліджень в даному напрямку полягає в дослідженні параметрів та характеристик магнітних редукторів, що використовуються в якості мультиплікаторів/редукторів або у складі автономних енергоустановок, таких як вітроелектричні системи.

Тому актуальним науково-практичним завданням є оцінка параметрів та характеристик магнітного редуктора при змінній швидкості вітру. Це дасть можливість відмовитись від механічного редуктора на

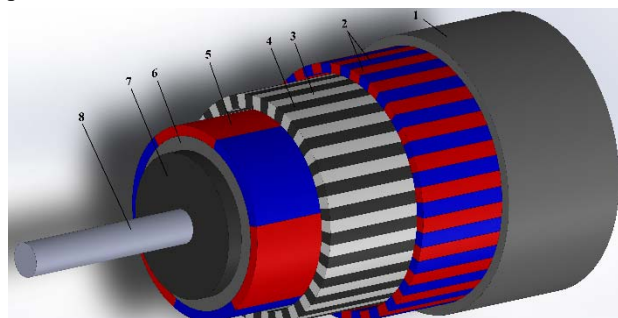
користь магнітного із подальшим підвищенням експлуатаційної надійності та ефективності такої системи.

### III. МЕТА РОБОТИ

Метою роботи є розробка чисельної польової математичної моделі магнітного редуктора, що працює у складі вітроустановки при змінній швидкості обертання вхідного валу та змінній швидкості вітру. При цьому досліджувалися основні вихідні параметри та характеристики магнітного редуктора: характер розподілу електромагнітного поля, електромагнітний момент ведучого та веденого роторів, розподіл магнітної індукції низькошвидкісного, високошвидкісного ротора та модулятора.

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

Розробка математичної моделі проводиться для варіанта магнітної системи магнітної передачі, виконаної за коаксіальною планетарною топологією (рис. 1). Основні розміри магнітної системи наведено на рис. 2.



**Рисунок 1.** Основні розміри магнітної системи досліджуваного варіанта магнітної передачі

На рис. 1 позначено: 1 – ярмо зовнішнього, низькошвидкісного ротора; 2 – постійні магніти зовнішнього ротора; 3 – немагнітопровідні вставки модулятора; 4 – магнітопровідні вставки магнітного модулятора (полюсні накінецьники); 5 – постійні магніти внутрішнього (високошвидкісного) ротора; 6 – ярмо внутрішнього ротора; 7 – немагнітний сплав внутрішнього ротора; 8 – вал.

Зовнішнє магнітне колесо прийнято нерухомим і надалі називається статором. Внутрішнє та проміжне магнітні колеса складають високошвидкісний та низькошвидкісний ротори відповідно. Відповідно до співвідношення швидкостей для коаксіальної планетарної магнітної передачі передатне відношення визначається як

$$i = \frac{p_c + p_e}{p_n} \quad (1)$$

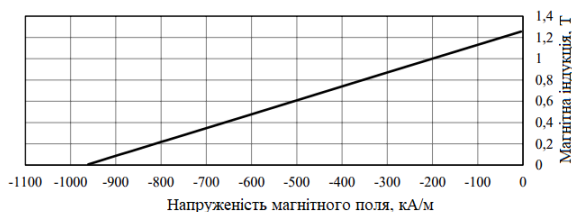
де  $p_c$  – число пар полюсів на статорі;  
 $p_n$  – число пар полюсів на високошвидкісному

роторі або, зважаючи на вираз (9)

$$i = \frac{N_c}{P_e} \quad (2)$$

Передатне відношення позитивне, що свідчить про спрямоване обертання роторів магнітної передачі.

За прототип використано варіант магнітної передачі з 26 парою полюсів на статорі, двома парами полюсів на високошвидкісному роторі та 30 сегментами низькошвидкісного ротора. Таким чином, згідно (1, 2) передатне відношення становило 15. Основні параметри магнітної системи моделі наведені в табл. 1. Постійні магніти виконані секторальними з однорідною намагніченістю в радіальному напрямку зі сплаву неодим-залізо-бір марки N38UH з залишковою магнітною індукцією 1,26 Т при 20 °С. Крива розмагнічування постійних магнітів наведена на рис. 2.



**Рисунок 2.** Крива розмагнічування постійного магніту N38UH при 20°C

Ярмо магнітопроводу статора виконано з холоднокатаної ізотропної електротехнічної сталі марки 2411, ярмо магнітопроводу високошвидкісного ротора - з електротехнічної сталі марки 21850. Сегменти низькошвидкісного ротора виконані з композитного магнітм'якого матеріалу на базі Somaloy. Вал високошвидкісного ротора виконаний з конструкційної сталі марки 45.

**Таблиця 1.** Основні параметри магнітної системи

Число пар полюсів високошвидкісного ротора	3
Число пар полюсів низькошвидкісного ротора	26
Кількість сталевих сегментів модулятора	29
Аксіальна довжина, мм	80
Залишкова магнітна індукція ПМ, Тл	1,26 (N38UH)
Передавальне відношення	8,67
Матеріал магнітопроводу статора	Сталь 2411
Матеріал магнітопроводу низькошвидкісного ротора	Somaloy
Матеріал магнітопроводу високошвидкісного ротора	Сталь 21850

Електропровідність постійних магнітів, МСм/м	0,56
Електропровідність Somaloy, МСм/м	0,14

Основні етапи при розробки польової математичної моделі полягають в наступному:

- 1) Побудова геометрії моделі в системі автоматизованого проектування AutoCAD;
- 2) Імпорт геометрії моделі в програмне середовище COMSOL Multiphysics;
- 3) Задання матеріалів та їх властивостей;
- 4) Задання змінних для керування параметрами дослідження;
- 5) Задання фізики розрахунку та граничних умов;
- 6) Побудова сітки скінченних елементів;
- 7) Проведення розрахунку;
- 8) Обробка отриманих результатів;

COMSOL Multiphysics – це пакет програмного забезпечення для аналізу кінцевих елементів, розв'язування та симуляції для різноманітних фізичних та інженерних програм.

Моделювання статичних характеристик магнітної передачі переважно проводилося у двовимірному наближенні.

Розрахунок статичного магнітного поля в двовимірному наближенні проводився з урахуванням таких припущень:

1. Не враховуються кінцеві ефекти;
2. Показники магніто-м'яких матеріалів задавалися з допомогою основної кривої намагнічування без урахування магнітного гістерезису;
3. Властивості постійних магнітів визначалися залишковою магнітною індукцією та кутом нахилу лінеаризованої кривої розмагнічування при постійній температурі  $T=20$  град.  $^{\circ}\text{C}$ ;
4. Розрахунок навантажувальної властивості проводився покроковим шляхом без урахування магнітних втрат;
5. Розрахункова область обмежена немагнітним колом, у будь-якій точці якої вектор магнітної індукції прийнятий дотичним.

Розрахункові рівняння та граничні умови формувалися щодо векторного магнітного потенціалу та відомих джерел магнітного поля:

$$\Delta^2 A = \mu \Delta \times M \quad (3)$$

$$n \times (A_1 - A_2) = 0 \quad (4)$$

$$n \times (\left[ \mu_0^{-1} \Delta \times A - M \right] - \left[ \mu_0^{-1} \Delta \times A - M \right]) = 0 \quad (5)$$

$$n \times A_{\text{вн}} = 0 \quad (6)$$

де  $M$  – вектор намагніченості, А/м;

$A$  – векторний магнітний потенціал, Вб/м;

$A_1, A_2$  – векторні магнітні потенціали на межі суміжних областей 1 і 2, Вб/м;

$A_{\text{вн}}$  – векторний магнітний потенціал на зовнішній межі розрахункової області, Вб/м;

$n$  – вектор нормалі.

Розрахунок електромагнітного моменту проводився через тензор натягу Максвелла. Вектор густини сили визначається за наступним виразом:

$$f = \mu(nH)H - 0,5nH^2 \quad (7)$$

де  $H$  – вектор напруженості магнітного поля, А/м.

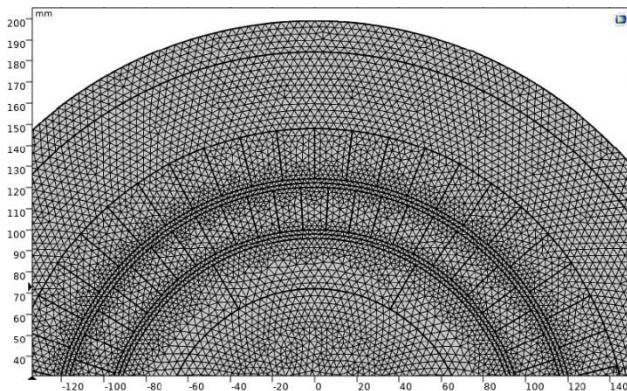
$$H = \mu^{-1} \Delta \times A - M \quad (8)$$

Електромагнітний момент, що діє на внутрішній та зовнішній ротори магнітної передачі визначається за наступним виразом:

$$T = \oint_{S_r} (r - r_0) \times fdS \quad (9)$$

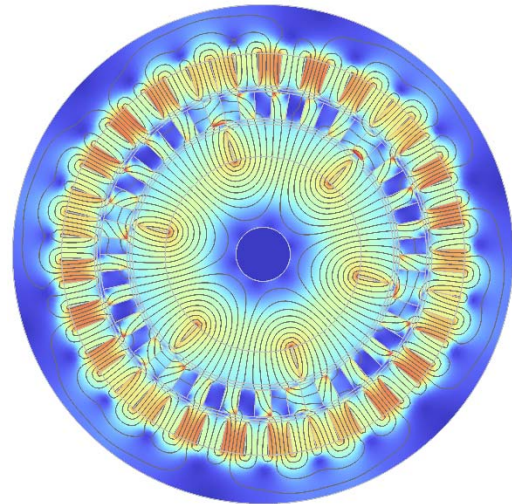
де  $S_r$  – довільна замкнута поверхня, що обмежує елемент, на який провадиться розрахунок електромагнітного моменту.

Загальна кількість елементів сітки у розробленій двовимірній моделі становить 296840 трикутних елементів, 880 вершинних елементів, 62661 крайових елементів. Загальний вигляд фрагменту сітки скінченних елементів розробленої моделі магнітного редуктора а показано на рис. 3.



**Рисунок 3.** Сітка скінченних елементів фрагмента розрахункової області досліджуваного магнітного редуктора

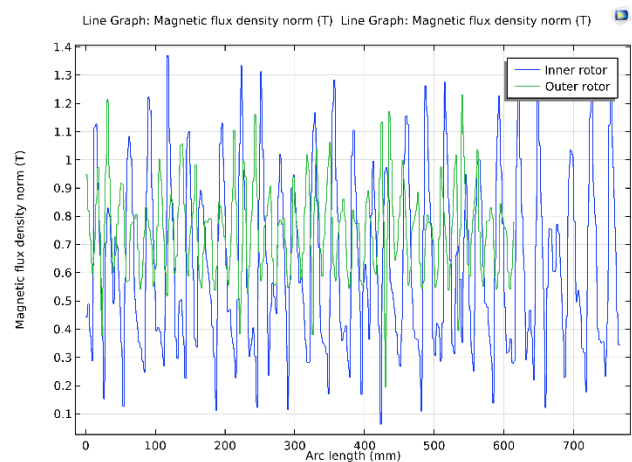
Розподіл магнітної індукції  $B$  та векторного магнітного потенціалу  $A$  в розрахунковій області досліджуваного магнітного редуктора показано на рис. 4.



**Рисунок 4.** Розподіл магнітної індукції та векторного магнітного потенціалу досліджуваного магнітного редуктора

Із рис. 4 видно, що магнітна система не є насиченою, в той же час середнє значення магнітної індукції в конструктивних елементах редуктора не перевищує допустимі значення для вибраних матеріалів та марки сталі. А саме: в ярмі високошвидкісного ротора середнє значення магнітної індукції становить 0,91 Тл, в ярмі низькошвидкісного ротора середнє значення магнітної індукції становить 0,47 Тл, в феромагнітних осердях модулятора магнітного потоку середнє значення магнітної індукції становить 0,94 Тл, середнє значення індукції в повітряному проміжку, що межує між високошвидкісним ротором та модулятором становить 0,75 Тл, середнє значення індукції в повітряному проміжку, що межує між низькошвидкісним ротором та модулятором становить 0,63 Тл.

Розподіл магнітної індукції в повітряному проміжку, що межує з зовнішнім та внутрішнім ротором і модулятором магнітного потоку показано на рис. 5.

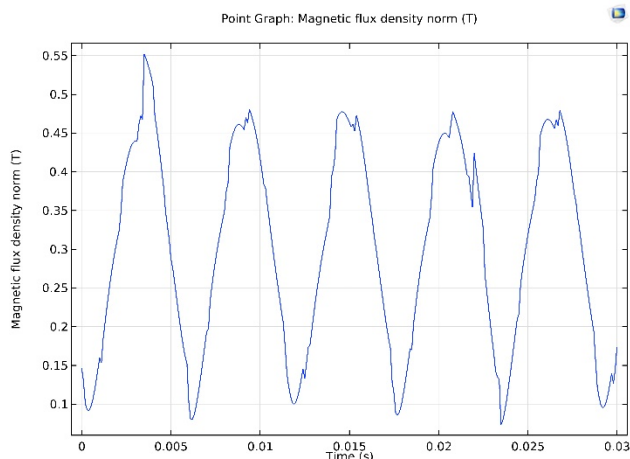


**Рисунок 5.** Розподіл модуля магнітної індукції в повітряному проміжку зовнішнього та внутрішнього роторів



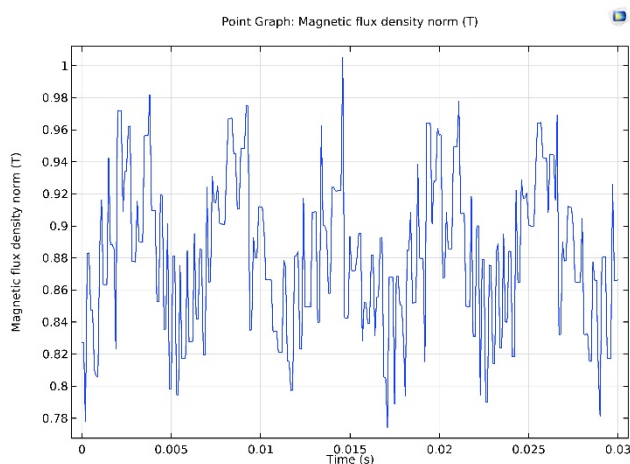
Згідно з рис. 5, середня індукція у повітряному проміжку, що розділяє високошвидкісний ротор від модулятора, складає 0,75 Тл, тоді як середня індукція у повітряному проміжку між низькошвидкісним ротором та модулятором становить 0,63 Тл. Нерівномірність розподілу індукції вздовж середньої лінії в повітряному проміжку пояснюється наявністю модулятора, який є дискретним елементом в конструкції будь-якого магнітного редуктора.

На рис. 6 показано розподіл магнітної індукції в зовнішньому низькошвидкісному роторі досліджуваного магнітного редуктора при швидкості обертання  $\approx 200$  об/хв.



**Рисунок 6.** Розподіл магнітної індукції в зовнішньому низькошвидкісному роторі

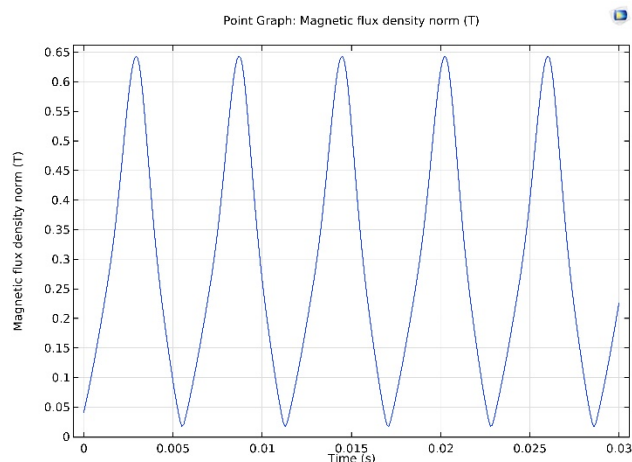
На рис. 7 показано розподіл магнітної індукції в внутрішньому високошвидкісному роторі досліджуваного магнітного редуктора при швидкості обертання  $\approx 1750$  об/хв.



**Рисунок 7.** Розподіл магнітної індукції в зовнішньому високошвидкісному роторі

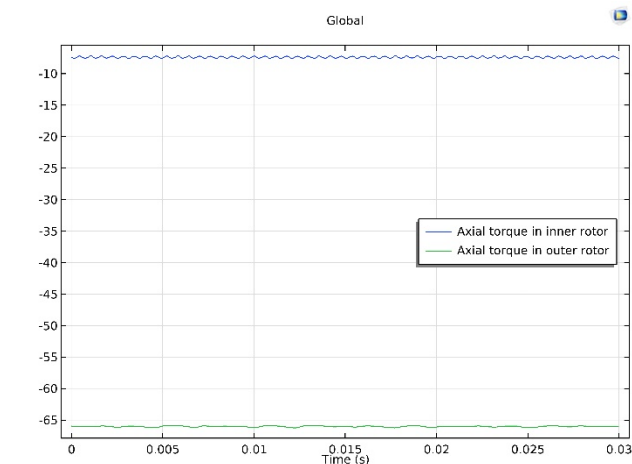
На рис. 8 показано розподіл магнітної індукції в магнітному модуляторі досліджуваного магнітного

редуктора при швидкості обертання внутрішнього  $\approx 1750$  об/хв та зовнішнього роторів 200 об/хв.



**Рисунок 8.** Розподіл магнітної індукції в модуляторі магнітного потоку

Залежність електромагнітного моменту внутрішнього та зовнішнього роторів магнітного редуктора при постійній швидкості обертання внутрішнього та зовнішнього роторів від часу показано на рис. 9.

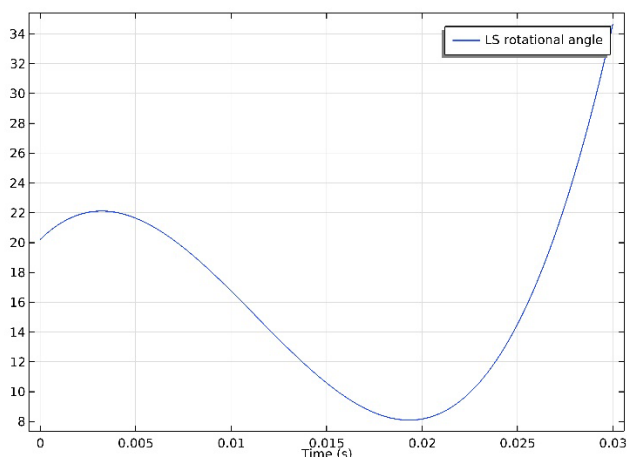


**Рисунок 9.** Залежність електромагнітного моменту роторів від часу

По рис. 9 видно, що середнє значення електромагнітного моменту зовнішнього (високошвидкісного) ротора становить  $\approx 7,4$  Н·м, тоді як величина електромагнітного моменту для зовнішнього ротора становить  $\approx 66$  Н·м. Відношення моментів зовнішнього та внутрішнього роторів становить 8,92, що корелюється із коефіцієнтом редукції досліджуваного редуктора (табл. 1).

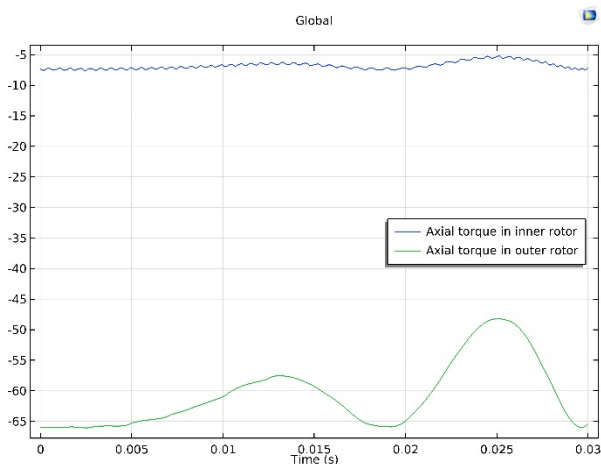
При зміні швидкості вітру змінюється швидкість обертання валу ротора вітроустановки і відповідно швидкість обертання низькошвидкісного ротора магнітного редуктора. Імітація зміни швидкості вітру

реалізована шляхом додавання до розробленої моделі у програмному пакеті COMSOL Multiphysics параметризованої функції. Характер зміни кутової швидкості показано на рис. 10.



**Рисунок 10.** Характер зміни кутової швидкості вхідного ротора магнітного редуктора при зміні швидкості вітру

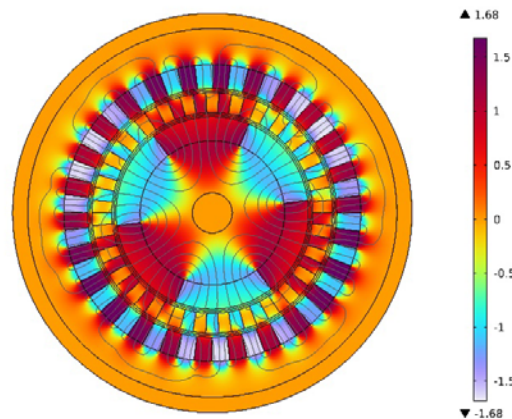
При зміні швидкості вітру змінюється і електромагнітний момент магнітного редуктора, що видно на рис. 11.



**Рисунок 11.** Момент низькошвидкісного (зелена крива) та високошвидкісного (синя крива) роторів магнітного редуктора

По рис. 11 видно, що при збільшенні швидкості вітру відбувається зменшення величини електромагнітного моменту, тоді як при зменшенні швидкості електромагнітний момент як внутрішнього так і зовнішнього роторів збільшуються пропорційно коефіцієнту редукції (табл. 1).

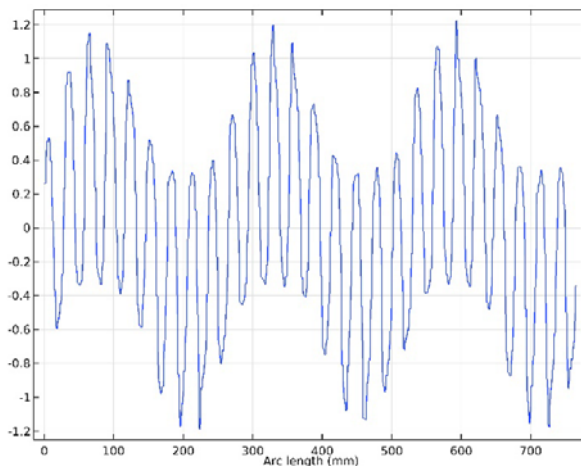
Розподіл електромагнітного поля та векторного магнітного потенціалу  $A$  при зміні швидкості вітру та швидкості обертання магнітного редуктора в довільний момент часу показано на рис. 12.



**Рисунок 12.** Розподіл вектора магнітної індукції  $B$  та векторного магнітного потенціалу  $A$  (лінії) при зміні швидкості обертання

При зменшенні швидкості обертання відносно номінальної, спостерігається зменшення рівня магнітної індукції та насичення в окремих конструктивних елементах магнітної системи магнітного редуктора (рис. 4), що чітко корелюється з відомими теоретичними відомостями. Так, в ярмі високошвидкісного ротора середнє значення магнітної індукції становить 0,84 Тл, в ярмі низькошвидкісного ротора середнє значення магнітної індукції становить 0,42 Тл, в феромагнітних осердях модулятора магнітного потоку середнє значення магнітної індукції становить 0,83 Тл, середнє значення індукції в повітряному проміжку, що межує між високошвидкісним ротором та модулятором становить 0,69 Тл, середнє значення індукції в повітряному проміжку, що межує між низькошвидкісним ротором та модулятором становить 0,57 Тл.

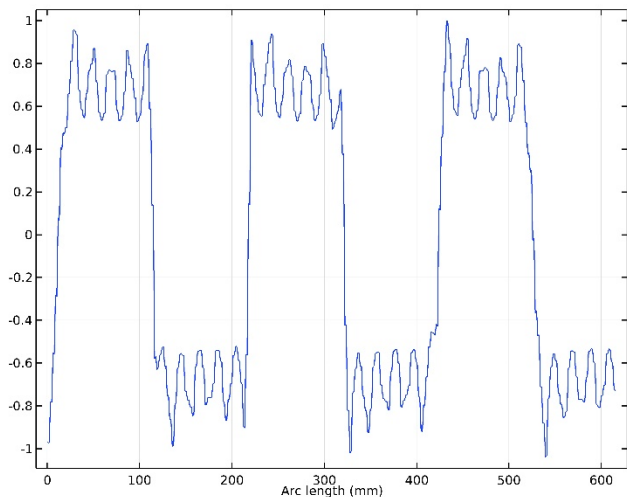
Нормальна складова магнітної індукції в повітряному проміжку між низькошвидкісним ротором та модулятором магнітного потоку показано на рис. 13.



**Рисунок 13.** Нормальна складова магнітної індукції в повітряному проміжку низькошвидкісного ротора

По рис. 13 видно, що амплітуда магнітної індукції в повітряному проміжку становить  $\approx 1,2$  Тл. Пульсації магнітної індукції відповідають дискретному розміщенню постійних магнітів на внутрішній розточці низькошвидкісного ротора.

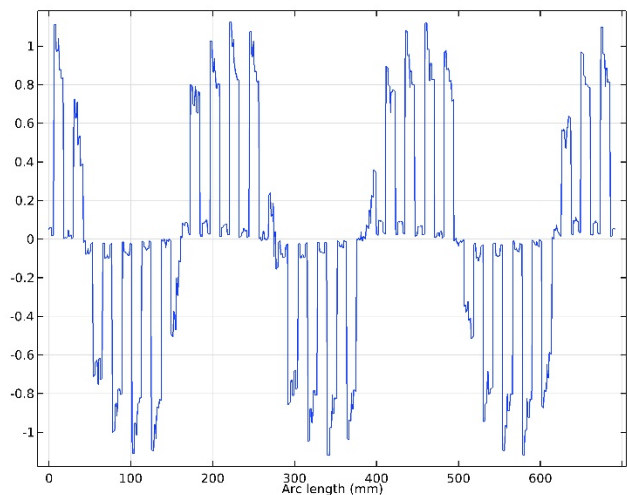
Нормальна складова магнітної індукції в повітряному проміжку між високошвидкісним ротором та модулятором магнітного потоку показано на рис. 14.



**Рисунок 14.** Нормальна складова магнітної індукції в повітряному проміжку високошвидкісного ротора

По рис. 14 видно, що амплітуда магнітної індукції в повітряному проміжку становить  $\approx 0,8$  Тл. Пульсації магнітної індукції відповідають дискретному розміщенню постійних магнітів на зовнішній розточці високошвидкісного ротора.

Розподіл нормальної складової магнітної індукції в модуляторі магнітного потоку при змінній швидкості обертання показано на рис. 15.



**Рисунок 15.** Нормальна складова магнітної індукції в модуляторі магнітного потоку

По рис. 15 видно, що амплітуда магнітної індукції в модуляторі магнітного потоку становить  $\approx 0,8$  Тл. Пульсації магнітної індукції відповідають

дискретному розміщенню феромагнітних елементів модулятора.

## V. ВИСНОВКИ

Розроблено двовимірну польову математичну модель магнітного редуктора для роботи у складі вітроустановки малої потужності. За допомогою розробленої моделі проведено аналіз електромагнітного поля, параметрів та характеристик магнітного редуктора при постійній та змінній швидкості обертання.

Середнє значення електромагнітного моменту зовнішнього (високошвидкісного) ротора становить  $\approx 7,4$  Н·м, тоді як величина електромагнітного моменту для зовнішнього ротора становить  $\approx 66$  Н·м. Відношення моментів зовнішнього та внутрішнього роторів становить 8,92, що корелюється із коефіцієнтом редукції досліджуваного редуктора.

При зміні швидкості вітру змінюється швидкість обертання магнітного редуктора і відповідні величини електромагнітних моментів високошвидкісного та низькошвидкісного роторів магнітного редуктора.

В даному дослідженні було показано, що магнітна система редуктора не досягає насичення. При цьому середні значення магнітної індукції в конструктивних елементах редуктора залишаються в межах допустимих значень для використовуваних матеріалів та марок сталі. Нерівномірний розподіл індукції вздовж середньої лінії в повітряному проміжку пояснюється наявністю модулятора, який є дискретним елементом в конструкції будь-якого магнітного редуктора. Це може впливати на роботу системи та вимагати удосконалення для підвищення її ефективності.

При збільшенні швидкості вітру відбувається зменшення величини електромагнітного моменту, тоді як при зменшенні швидкості електромагнітний момент як внутрішнього так і зовнішнього роторів збільшуються пропорційно коефіцієнту редукції.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] V.M.Golovko Mathematical simulation of autonomous wind electric installation with magnetoelectric generator / V.M.Golovko, M.Ya.Ostroverkhov, M.A.Kovalenko, I.Ya.Kovalenko, D.V.Tsyplenkov // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2022, (5): 074 – 079. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-5/074>.
- [2] Chumack V. Voltage stabilization of a controlled autonomous magnetoelectric generator with a magnetic shunt and permanent magnet excitation / Chumack V., Bazenov V., Tymoshchuk O., Kovalenko M., Tsyvinskyi S., Kovalenko I., Tkachuk I. // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(5 (114), 56–62. (ISSN 1729-3774).
- [3] Ostroverkhov, M. Development of the control system for taking off the maximum power of an autonomous wind plant with a synchronous magnetoelectric gen-

- erator / Ostroverkhov, M., Chumack, V., Kovalenko, M., Kovalenko, I. // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(2(118)), 67–78. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.263432>.
- [4] Jian, Huang. Design and realization of a novel magnetic nutation drive for industry robotic wrist reducer / Jian Huang, Yao Ligang Li, Wen-jian, Zhang, Jun // *Industrial Robot: An International Journal*. 44. 58-63. 10.1108/IR-04-2016-0130.
- [5] Yu, W. The design method of a novel magnetic suction gear reducer / Yu, W & Wang, C & Xu, T. // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 504. 012093. 10.1088/1757-899X/504/1/012093.
- [6] S. Hasanpour Cycloidal Reluctance Magnetic Gears for High Gear Ratio Applications / S. Hasanpour, M. Johnson, M. C. Gardner, H. A. Toliyat // *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 58, no. 6, pp. 1-10, Art no. 8001210, doi: 10.1109/TMAG.2022.3163419.
- [7] M. C. Gardner Optimization of Coaxial Magnetic Gear Design and Magnet Material Grade at Different Temperatures and Gear Ratios / M.C. Gardner, B. Praslicka, M. Johnson, H. A. Toliyat // *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 36, no. 3, pp. 2493-2501, doi: 10.1109/TEC.2021.3054806.
- [8] B. Dai "Cogging Torque Reduction of Integer Gear Ratio Axial-Flux Magnetic Gear for Wind-Power Generation Application by Using Two New Types of Pole Pieces / B. Dai, K. Nakamura, Y. Suzuki, Y. Tachiya and K. Kuritani // *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 58, no. 8, pp. 1-5, Art no. 8002205, doi: 10.1109/TMAG.2022.3159002.
- [9] Чумак В. Корекція вихідної потужності генератора безмультиплікаторної вітроелектроустановки при дискретних та випадкових значеннях швидкості вітру / Чумак В., Островерхов М., Коваленко М., Головка В., Коваленко І. // *Вісник НТУ «ХП»*. Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика, (2 (8)), 39–46. <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2022.2.07>.
- [10] Чумак В. Порівняння синхронних генераторів для автономної бензинової установки / Чумак В., Коваленко М., Ткачук І., Коваленко І. // *Вісник НТУ «ХП»*. Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика, (2 (8)), 32–38. <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2022.2.06>.
- [11] Moghimi, Ali. Triple-speed coaxial magnetic gear for wind turbine applications: introduction and comprehensive analysis. *COMPEL* / Moghimi Ali, Aliabadi, M., Farahani H. // *The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*. 41. 10.1108/COMPEL-01-2022-0001.
- [12] K. Aiso A Novel Flux-Switching Magnetic Gear for High-Speed Motor Drive System / K. Aiso, K. Akatsu and Y. Aoyama // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 68, no. 6, pp. 4727-4736, June 2021, doi: 10.1109/TIE.2020.2988230.
- [13] Ruiz-Ponce G. A Review of Magnetic Gear Technologies Used in Mechanical Power Transmission / Ruiz-Ponce G. Arjona, M.A., Hernandez, C., Escarela-Perez, R.A. // *Energies* **2023**, *16*, 1721. <https://doi.org/10.3390/en16041721>.
- [14] Wang Y. A Review on Magnetic Gears: Topologies, Computational Models, and Design Aspects / Y. Wang, M. Filippini, N. Bianchi, P. Alotto, // *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 55, no. 5, pp. 4557-4566, doi: 10.1109/TIA.2019.2916765.
- [15] Nielsen S. S. Pole and Segment Combination in Concentric Magnetic Gears: Vibrations and Acoustic Signature / S. S. Nielsen, H. Y. Wong, H. Baninajar, J. Z. Bird, P. O. Rasmussen // *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 37, no. 3, pp. 1644-1654, doi: 10.1109/TEC.2022.3151654.
- [16] Перминов Ю.Н. Алгоритм расчета синхронных генераторов торцевой конструкции с двумя магнитными системами, расположенными по торцам статора, для ветроэнергетических установок / Перминов Ю.Н., Коханевич В.П., Зинченко Т.В. // *Відновлювана енергетика*. 2016. № 2. С. 45-49.

Стаття надійшла до редакції 31.07.2023

## EVALUATION OF MAGNETIC GEAR PARAMETERS FOR AUTONOMOUS WIND INSTALLATION WITH CHANGING WIND SPEED

KOVALENKO  
M.A.

PhD, Associate Professor Department of Electromechanics National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", e-mail: kovalenko\_ma@i.ua;

CHUMACK V.V.

PhD, Associate Professor Department of Electromechanics National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", chumack\_kpi@ukr.net

KOVALENKO I.Y.

Assistant of Renewable Energy Sources, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" e-mail: 2048141@ukr.net;

TKACHUK I.V.

Postgraduate student, Department of Electromechanics National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", e-mail: baja0073@gmail.com;



HARFORD A.G.

Postgraduate student, Department of Electrotechnical Devices and Electrotechnological Complexes National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", e-mail: mojavrocketman@gmail.com.

**Purpose.** To evaluate the parameters and characteristics of the magnetic gearbox at constant and variable wind speed as part of an autonomous wind power plant.

**Methodology.** Analysis of existing methods of mathematical modeling of magnetic gearboxes. Numerical methods of mathematical modeling based on finite elements. Numerical methods of processing the obtained results.

**Findings.** A two-dimensional field mathematical model has been developed to estimate the parameters and characteristics of the magnetic gearbox at variable and constant wind speed. With the help of the developed model, the electromagnetic field, parameters and characteristics of the magnetic gearbox were analyzed both at a constant and at a variable speed of rotation. In particular, it was found that the magnetic system of the reducer does not reach saturation, while the average values of magnetic induction in the structural elements of the reducer remain within the permissible values for the used materials and grades of steel. The obtained data on the average values of the electromagnetic moments of the outer (high-speed) rotor and the inner rotor make it possible to understand the relationship between them and their influence on the operation of the system. A conclusion was made about the uneven distribution of induction along the middle line in the air gap, which is caused by the presence of a modulator in the design of the reducer. In addition, according to the obtained results, the change in wind speed affects the speed of rotation of the magnetic gearbox and the magnitude of the electromagnetic moments of the high-speed and low-speed rotors. Such information helps to understand the dynamics of system operation under different environmental conditions. The results obtained in the study are important for further improvement of the magnetic reducer design and ensuring more efficient operation of the low-power wind turbine. They can be used to optimize the structure and increase its productivity, which will contribute to the development of wind energy and the green energy industry in general. The average value of the electromagnetic moment of the outer (high-speed) rotor is about 7.4 N·m, while for the inner rotor the value of the electromagnetic moment is about 66 N·m. The ratio of the moments of the outer and inner rotors is 8.92, which correlates with the reduction factor of the gear under study.

**Originality.** A two-dimensional field mathematical model has been developed, which takes into account the change in the parameters and characteristics of the magnetic gearbox when the wind speed changes and the random rotation speed of the wind generator rotor.

**Practical value.** The results of the research of the magnetic reducer for a low-power wind turbine have an important contribution to the development of wind energy, contribute to increasing the efficiency and reliability of energy production, and contribute to the creation of a more sustainable and environmentally friendly energy complex.

**Keywords:** magnetic gearbox, wind turbine, field mathematical model, electromagnetic field, design optimization, wind energy

## REFERENCES

- [1] V.M.Golovko, M.Ya.Ostroverkhov, M.A.Kovalenko, I.Ya.Kovalenko, D.V.Tsyplenkov. (2022). Mathematical simulation of autonomous wind electric installation with magnetoelectric generator // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu.*, (5): 074 – 079. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-5/074>.
- [2] Chumack, Vadim and Bazenov, Volodymyr and Tymoshchuk, Oksana and Kovalenko, Mykhailo and Tsyvinskyi, Serhii and Kovalenko, Iryna and Tkachuk, Ihor, Voltage stabilization of a controlled autonomous magnetoelectric generator with a magnetic shunt and permanent magnet excitation (December 21, 2021). *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(5 (114), 56–62. (ISSN 1729-3774).
- [3] Ostroverkhov, M., Chumack, V., Kovalenko, M., & Kovalenko, I. (2022). Development of the control system for taking off the maximum power of an autonomous wind plant with a synchronous magnetoelectric generator. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(2(118), 67–78. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.263432>.
- [4] ian, Huang & Yao, Ligang & Li, Wen-jian & Zhang, Jun. (2017). Design and realization of a novel magnetic nutation drive for industry robotic wrist reducer. *Industrial Robot: An International Journal*. 44. 58-63. 10.1108/IR-04-2016-0130.
- [5] Yu, W & Wang, C & Xu, T. (2019). The design method of a novel magnetic suction gear reducer. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 504. 012093. 10.1088/1757-899X/504/1/012093.
- [6] S. Hasanpour, M. Johnson, M. C. Gardner and H. A. Toliyat, "Cycloidal Reluctance Magnetic Gears for High Gear Ratio Applications," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 58, no. 6, pp. 1-10, June 2022, Art no. 8001210, doi: 10.1109/TMAG.2022.3163419.
- [7] M. C. Gardner, B. Praslicka, M. Johnson and H. A. Toliyat, "Optimization of Coaxial Magnetic Gear Design and Magnet Material Grade at Different Temperatures and Gear Ratios," in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 36, no. 3, pp. 2493-2501, Sept. 2021, doi: 10.1109/TEC.2021.3054806.
- [8] B. Dai, K. Nakamura, Y. Suzuki, Y. Tachiya and K. Kuritani, "Cogging Torque Reduction of Integer Gear Ratio Axial-Flux Magnetic Gear for Wind-Power Generation Application by Using Two New Types of Pole Pieces," in *IEEE Transactions on Magnetics*,

- vol. 58, no. 8, pp. 1-5, Aug. 2022, Art no. 8002205, doi: 10.1109/TMAG.2022.3159002.
- [9] Chumak, V., Ostrovierkhov, M., Kovalenko, M., Holovko, V., & Kovalenko, I. (2022). Korektsiia vykhidnoi potuzhnosti heneratora bezmulyplikatornoi vitroelektroustanovky pry dyskretnykh ta vypadkovykh znachenniakh shvydkosti vitru. Visnyk NTU «KhPI». Serii: Problemy udoskonaliuvannia elektrychnykh mashyn I aparativ. Teoriia I praktyka, (2 (8), 39–46. <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2022.2.07>.
- [10] Chumak, V., Kovalenko, M., Tkachuk, I., & Kovalenko, I. (2022). Porivniannia synkhronnykh heneratoriv dlia avtonomnoi benzynovoi ustanovky. Visnyk NTU «KhPI». Serii: Problemy udoskonaliuvannia elektrychnykh mashyn I aparativ. Teoriia I praktyka, (2 (8), 32–38. <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2022.2.06>.
- [11] Moghimi, Ali & Aliabadi, Mahmood & Farahani, Hassan. (2022). Triple-speed coaxial magnetic gear for wind turbine applications: introduction and comprehensive analysis. COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering. 41. 10.1108/COMPEL-01-2022-0001.
- [12] K. Aiso, K. Akatsu and Y. Aoyama, "A Novel Flux-Switching Magnetic Gear for High-Speed Motor Drive System," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 68, no. 6, pp. 4727-4736, June 2021, doi: 10.1109/TIE.2020.2988230.
- [13] Ruiz-Ponce, G.; Arjona, M.A.; Hernandez, C.; Escarela-Perez, R. A Review of Magnetic Gear Technologies Used in Mechanical Power Transmission. Energies 2023, 16, 1721. <https://doi.org/10.3390/en16041721>.
- [14] Y. Wang, M. Filippini, N. Bianchi and P. Alotto, "A Review on Magnetic Gears: Topologies, Computational Models, and Design Aspects," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 55, no. 5, pp. 4557-4566, Sept.-Oct. 2019, doi: 10.1109/TIA.2019.2916765.
- [15] S. S. Nielsen, H. Y. Wong, H. Baninajar, J. Z. Bird and P. O. Rasmussen, "Pole and Segment Combination in Concentric Magnetic Gears: Vibrations and Acoustic Signature," in IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 37, no. 3, pp. 1644-1654, Sept. 2022, doi: 10.1109/TEC.2022.3151654.
- [16] Permynov Yu.N., Kokhanevych V.P., Zynchenko T.V. (2016). Alhorytm rascheta synkhronnykh heneratorov tor-tsevoi konstruktsyy s dvumia mahnytnymy systema-my, raspolozhennymy po tortsam statora, dlia vetroenerhetycheskykh ustanovok. Vidnovliuvana enerhetyka. No 2, 45-49.

УДК 621.314.212:543.544.3

## АНАЛІТИЧНИЙ МЕТОД РОЗПІЗНАВАННЯ ТИПУ ДЕФЕКТУ МАСЛОНАПОВНЕНОГО ОБЛАДНАННЯ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ АНАЛІЗУ РОЗЧИНЕНИХ У МАСЛІ ГАЗІВ

ШУТЕНКО О.В. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри передачі електричної енергії Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: o.v.shutenko@gmail.com;

КУЛИК О.С. аспірант кафедри передачі електричної енергії Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: oleksii.kulyk@ieee.khpi.edu.ua;

**Мета роботи.** Розробка методу розпізнавання типу дефекту маслонаповненого обладнання за результатами аналізу розчинених у маслі газів.

**Методи дослідження.** Аналіз значень відношень газів в маслонаповненому обладнанні з дефектами різного типу, синтез методу для розпізнавання типу дефектів.

**Отримані результати.** Наведено опис аналітичного методу для розпізнавання типу дефектів маслонаповненого обладнання за результатами аналізу розчинених у маслі газів. Для розпізнавання типу дефекту використовуються значення трьох відношень –  $CH_4/H_2$ ,  $C_2H_4/C_2H_6$  і  $C_2H_2/C_2H_4$ . Використання цих відношень дозволяє розпізнавати 40 дефектів різного типу та їх комбінацій. Даним дефектам відповідають 25 різних діапазонів значень відношень газів, отримані в результаті досліджень вмісту газів для 3715 одиниць маслонаповненого обладнання. Визначення типу дефекту відбувається шляхом аналізу отриманих значень відношень газів і їх класифікації відповідно до діапазонів значень відношень газів кожного із дефектів. У випадку, коли отримані значення відношень відповідають одразу кільком типам дефектів в одному діапазоні значень, для уточнення типу дефекту використовуються характерні номограми дефектів та рекомендації відповідно до положень методу ключового газу. Виконано порівняльний аналіз достовірності розпізнавання типу дефекту з використанням розробленого методу та деяких відомих методів інтерпретації результатів аналізу розчинених у маслі газів.

**Наукова новизна.** Запропоновано аналітичний метод для розпізнавання типу дефектів маслонаповненого обладнання електричних мереж за результатами аналізу розчинених у маслі газів. Даний метод відрізняється від існуючих тим, що при використанні трьох відомих відношень газів він дозволяє розпізнавати більшу кількість дефектів різного типу (40), в тому числі й тих, для яких відомі методи не дозволяють встановити діагноз. Такий результат забезпечується використанням 25 діапазонів значень відношень газів, отриманих за результатами досліджень вмісту газів для 3715 одиниць маслонаповненого обладнання.

**Практична цінність.** Використання розробленого методу для розпізнавання типу дефектів маслонаповненого обладнання електричних мереж дозволяє підвищити достовірність розпізнавання дефектів за результатами аналізу розчинених у маслі газів. Своєю чергою це дозволяє підвищити експлуатаційну надійність електроенергетичного обладнання та подовжити термін експлуатації цього обладнання.

**Ключові слова:** діагностика обладнання; аналіз розчинених у маслі газів (АРГ); аналітичний метод; розпізнавання типу дефекту; відношення газів; аналіз достовірності розпізнавання.

### I. ВСТУП

Своєчасне виявлення і розпізнавання дефектів в обладнанні електричних мереж дає змогу не тільки запобігти аварійному пошкодженню устаткування, а й забезпечити надійне постачання споживачів електричною енергією. Одним із методів неруйнівної діагностики стану маслонаповненого обладнання електричних мереж є аналіз розчинених у маслі газів (АРГ). Цей метод дає змогу виявляти дефекти обладнання, що розвиваються, на ранній стадії, що є його безумовною перевагою. У процесі інтерпретації результатів АРГ принципово важливо не тільки своєчасно виявити наявність дефекту, що розвивається, а й оцінити його тип, швидкість розвитку і ступінь його небезпе-

ки для обладнання. Фактично рішення про можливість подальшої експлуатації обладнання ухвалюється на основі цих висновків. У зв'язку з цим забезпечення високого рівня достовірності розпізнавання типу дефекту за результатами АРГ є актуальним завданням, розв'язанню якого і присвячена ця стаття.

### II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

На сьогодні розроблено досить велику кількість методів розпізнавання типу дефекту за результатами АРГ [1]-[14]. При цьому різні методи використовують різні діагностичні критерії для розпізнавання дефекту. Найбільш використовуваними діагностичними критеріями є відношення газів [1]-[7], значення відсоткового вмісту газів [9]-[14], а також номограми дефектів

[7], [8]. При цьому найчастіше більшість діагностичних методів дає змогу розпізнавати однаковий спектр дефектів, регламентований ІЕС 60599 [1]. Цими дефектами є часткові розряди (ЧР), розряди низької та великої енергії (P1 та P2 відповідно), а також нагрівання в діапазонах температур  $<300^{\circ}\text{C}$  (T1),  $300-700^{\circ}\text{C}$  (T2) і  $>700^{\circ}\text{C}$  (T3). Однак використання норм і критеріїв регламентованих стандартом ІЕС 60599 не завжди дає змогу розпізнати тип дефекту. Зокрема цей стандарт не дає змоги поставити діагноз для обладнання за результатами АРГ, якого отримано такі діапазони значень відношень газів:  $0,1 < \text{CH}_4/\text{H}_2 < 1$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6 < 1$  і  $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4 < 1$ ;  $0,1 < \text{CH}_4/\text{H}_2 < 1$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6 > 1$  і  $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4 < 0,6$ ;  $0,1 < \text{CH}_4/\text{H}_2 < 1$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6 < 1$  і  $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4 > 1$ . Крім того, в цьому методі не регламентовані значення відношень газів для комбінованих дефектів (нагрівань, які супроводжуються розрядами, або розрядів, що супроводжуються нагріваннями). Нині великого поширення набули вдосконалені методи розпізнавання. Найпоширенішим є вдосконалення вже наявних методів розпізнавання з використанням різних методів машинного навчання (наприклад, нечітка логіка [15], машина екстремального навчання [16], метод опорних векторів [17], адаптивна мережева система нечіткого логічного висновку [18] тощо). Такий підхід дає змогу значною мірою поліпшити достовірність розпізнавання дефектів. Однак актуальним залишається питання розпізнавання дефектів комбінованого типу та випадків, коли той чи інший метод не дає змоги встановити дефект. Для розв'язання цієї задачі в статті запропоновано новий метод розпізнавання.

### III. МЕТА РОБОТИ

Розробка нового методу розпізнавання типу дефекту маслонаповненого обладнання за результатами аналізу розчинених у маслі газів.

### IV. ЗАГАЛЬНА ПРОЦЕДУРА МЕТОДУ

Пропонований метод призначений для розпізнавання типу дефекту маслонаповненого обладнання за результатами аналізу розчинених у маслі газів. Даний метод використовується, у разі якщо значення концентрацій газів та/або значення швидкостей наростання газів перевищують граничні (типові) значення, які встановлені чинними міжнародними або національними стандартами.

За аналогією з національним стандартом України [1] та міжнародним ІЕС 60599 [2], а також методами Дорненбурга [3], Роджерса [4] та MSS [5] пропонований метод є аналітичним. Як і в [1], [2] у пропонованому методі для визначення типу дефекту використовуються значення відношень газів  $\text{CH}_4/\text{H}_2$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$  і  $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$ . Відмінною особливістю пропонованого методу від більшості чинних стандартів і методів є не тільки можливість розпізнавання електричних розрядів і локальних нагрівань, а й їх комбінацій із виді-

ленням основного та супутнього дефектів. Для визначення меж областей дефектів було використано результати АРГ для 3715 одиниць маслонаповненого обладнання, в якому було виявлено дефекти різного типу. Однак, проведений аналіз показав, що деякі різні типи дефектів мають близькі значення відношень характерних газів. У цьому разі, якщо одному діапазону відношень газів відповідають кілька можливих типів дефекту, для уточнення характеру прогнозованого пошкодження наведено характерні номограми дефектів, а також рекомендації, що ґрунтуються на положеннях методу ключового газу. Номограми дефектів будуються в такій послідовності: спочатку в аналізованій пробі масла визначають газ (гази), що має максимальне значення концентрації. Далі розраховують відношення концентрацій кожного з газів до газу з максимальною концентрацією. Після чого будується номограма дефекту, по осі абсцис розміщують гази строго в такому порядку:  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_2$ , а по осі ординат відкладають обчислені відношення для кожного з цих газів. Отримані точки з'єднують лінією. Порівнюють отриманий графік з еталонними номограмами і вибирають той, де досягається максимальний збіг. Ця номограма і визначає тип дефекту.

Для підвищення достовірності розпізнавання, значення відношень газів рекомендується визначати, якщо значення концентрацій газів, що становлять це відношення, або хоча б одного з газів перевищують такі значення:  $\text{H}_2=50$  мкл/л,  $\text{CH}_4=\text{C}_2\text{H}_4=\text{C}_2\text{H}_6=15$  мкл/л та  $\text{C}_2\text{H}_2=3$  мкл/л [1]. У разі якщо концентрації  $\text{C}_2\text{H}_2$  не перевищують межі виявлення хроматографом, для візуалізації локації точки, що відображає діагностований об'єкт, значення відношення  $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$  можна прийняти рівним 0,0001.

### V. РОЗПІЗНАВАННЯ ЧАСТКОВИХ РОЗРЯДІВ І ЇХ КОМБІНАЦІЙ З ІНШИМИ ДЕФЕКТАМИ

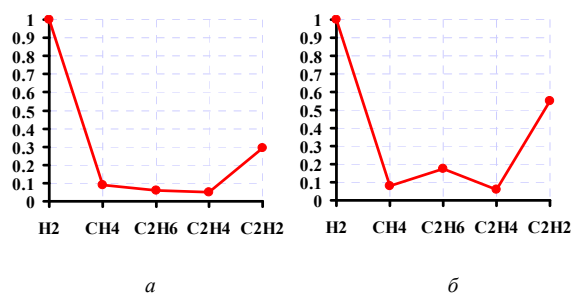
Для розпізнавання часткових розрядів і їх комбінацій з іншими дефектами запропоновано діапазони значень відношень газів, наведені у табл. 1. Цю таблицю використовують у тому разі, якщо значення відношення  $\text{CH}_4/\text{H}_2 < 0,1$ . Тип дефекту визначається за значеннями відношень  $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$  та  $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$ . Залежно від отриманих значень відношень було виділено 9 різних діапазонів значень відношень газів, які дають змогу розпізнати 10 різних комбінацій ЧР.

Область, характерна для ЧР з низькою щільністю енергії (НЕЧР), обмежена значеннями відношень  $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6 < 0,2$  і  $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4 < 1$ . Такі ж діапазони значень відношень газів можуть мати місце і для нагрівань з температурою  $150-300^{\circ}\text{C}$ , які супроводжуються ЧР (T1+ЧР). Але для таких дефектів газом із максимальним вмістом є  $\text{C}_2\text{H}_6$ , тому їх досить легко відрізнити від НЕЧР, для яких газом із максимальним вмістом є  $\text{H}_2$ .

**Таблиця 1.** Визначення типу дефекту за допомогою пропонованого методу при  $CH_4/H_2 < 0,1$ 

Тип дефекту	Значення відношень газів		
	$CH_4/H_2$	$C_2H_4/C_2H_6$	$C_2H_2/C_2H_4$
ЧР з низькою щільністю енергії (НЕЧР)	<0,1	<0,2	<1
ЧР, що супроводжуються нагріваннями в діапазонах температур 150-300°C (ЧР+Т1)		0,2-1	
Нагрівання в діапазонах температур 150-300°C, що супроводжуються ЧР (Т1+ЧР)		<1	
ЧР, що супроводжуються нагріваннями в діапазонах температур 300-700°C (ЧР+Т2)		1-4	
Нагрівання в діапазонах температур >700°C, що супроводжуються ЧР (ЧР+Т3)		1-4	
ЧР, що супроводжуються іскровими розрядами (ЧР+Іскріння)		>1	>1
Критичні ЧР			
Критичні ЧР, що супроводжуються нагріваннями в діапазонах температур 150-300°C (Критичні ЧР+Т1)		<1	
ЧР, що супроводжуються або переходять у розряди з низькою щільністю енергії (ЧР+Р1)		1-2	
ЧР, що супроводжуються або переходять у розряди з високою щільністю енергії (ЧР+Р1)		>2	

Критичним частковим розрядам, тобто частковим розрядам, які залишають сліди, або призводять до пробою ізоляції, відповідає область, що обмежена значеннями відношень  $C_2H_4/C_2H_6 < 1$  та  $C_2H_2/C_2H_4 > 1$ . Такі ж значення відношень газів характерні і для критичних ЧР, які супроводжуються низькотемпературним нагріванням (Критичні ЧР+Т1). Розрізнити ці дефекти можна з використанням відношення  $C_2H_6/CH_4$ , для критичних ЧР значення відношення  $C_2H_6/CH_4 < 1$ , а для критичних ЧР+Т1 –  $C_2H_6/CH_4 > 1$ . Також розрізнити ці дефекти можна з використанням номограм дефектів, які наведено на рис. 1.



**Рисунок 1.** Номограми, що відповідають критичним ЧР (а) і критичним частковим розрядам, що супроводжуються нагріванням у діапазоні температур 150-300°C (б)

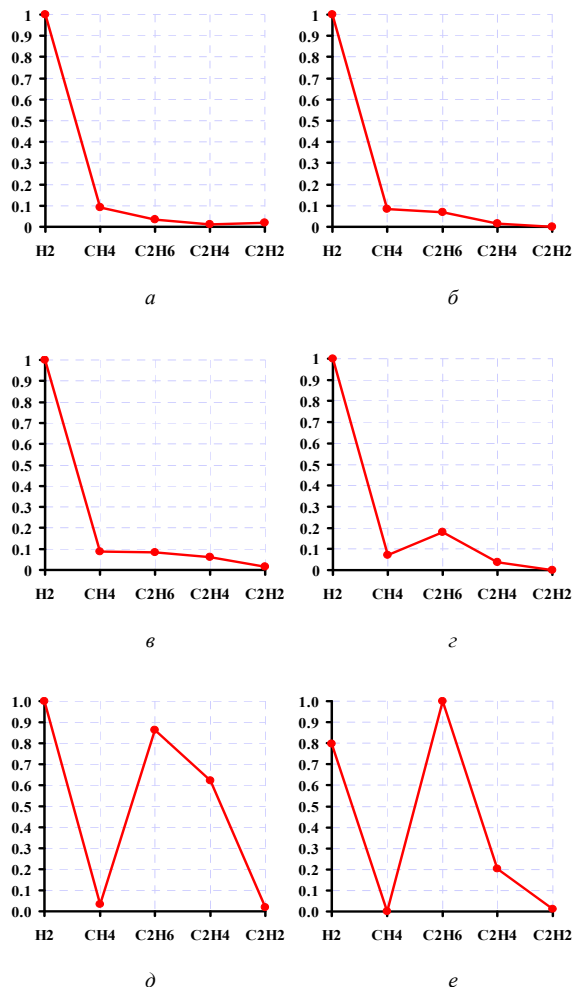
Суттєвою відмінністю пропонованого методу від більшості існуючих аналогів є можливість розпізнавання комбінацій ЧР з іншими дефектами. Зокрема для розпізнавання ЧР, які супроводжуються нагріван-

ням, виділено області, що відповідають ЧР з нагріванням у діапазоні температур 150-300°C (газом із максимальним вмістом  $\epsilon H_2$ ), нагріванням у діапазоні температур 150-300°C, що супроводжуються ЧР (газом із максимальним вмістом  $\epsilon C_2H_6$ ), та ЧР, які супроводжуються нагріванням у діапазоні температур 300-700°C. Межі областей ЧР+Т1 та Т1+ЧР обмежені значеннями відношень  $0,2 < C_2H_4/C_2H_6 < 1$  і  $C_2H_2/C_2H_4 < 1$ , а межі області ЧР+Т2 –  $1 < C_2H_4/C_2H_6 < 4$  і  $C_2H_2/C_2H_4 < 1$ . Характерні номограми для таких дефектів наведені на рис. 2.

Якщо для комбінацій ЧР з термічними дефектами в деяких методиках, наприклад у [5], регламентовані значення відношень газів, то для ЧР, які супроводжуються або переходять у розряди з більшою щільністю енергії, значення відношень газів не регламентовані в жодному зі стандартів чи методик. Як видно із табл. 1, для розпізнавання таких дефектів виділено 3 області. Область ЧР+Р1 відповідає ЧР, які супроводжуються розрядами з низькою щільністю енергії. Ця область обмежена значеннями відношень  $1 < C_2H_4/C_2H_6 < 2$  і  $C_2H_2/C_2H_4 > 1$ . Область ЧР+Р2 відповідає ЧР, які супроводжуються розрядами з високою щільністю енергії. Для цієї області характерні значення відношень  $C_2H_4/C_2H_6 > 2$  і  $C_2H_2/C_2H_4 > 1$ . Область ЧР+Іскріння призначена для розпізнавання ЧР, які супроводжуються іскровими розрядами.

Для таких дефектів значення відношень  $C_2H_4/C_2H_6 > 1$  і  $C_2H_2/C_2H_4 < 1$ . Якщо значення відношення  $1 < C_2H_4/C_2H_6 < 4$ , можливе потрапляння значень, що відповідають ЧР, які супроводжуються іскрінням, у область ЧР, що супроводжуються нагріванням із

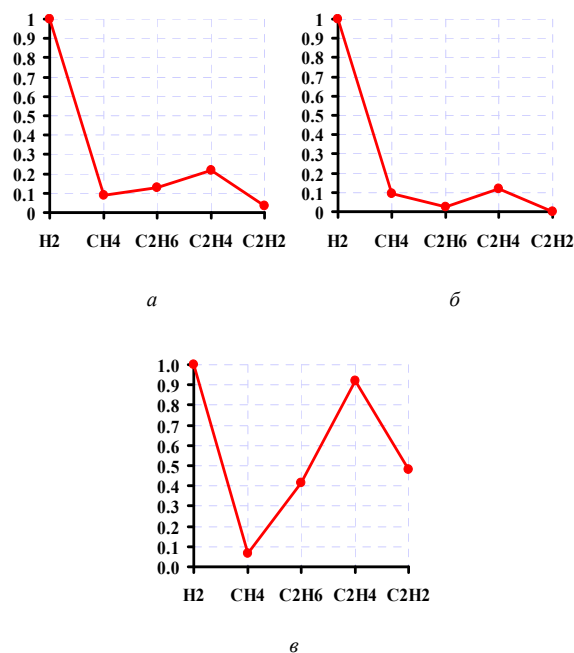
температурою 300-700°C. Для уточнення типу дефекту, в разі відповідності значень відношень газів для діагностованого обладнання об'єднаної області ЧР+Іскріння та ЧР+Т2, можна використовувати номограми, наведені на рис. 3.



**Рисунок 2.** Номограми, що відповідають ЧР, які супроводжуються нагріванням з температурою 150-300°C (а-д), і нагріванням у діапазоні температур 150-300°C, що супроводжуються ЧР (е)

Із табл. 1 видно, що область зі значеннями відношень  $C_2H_4/C_2H_6 > 4$  і  $C_2H_2/C_2H_4 < 1$  відповідає ЧР, що супроводжуються іскровими розрядами, а також нагріванням із температурою вище 700°C, які супроводжуються ЧР. У цьому разі для уточнення типу дефекту достатньо визначити газ із максимальним вмістом – для ЧР, що супроводжуються іскровими розрядами, максимальний вміст має  $H_2$ , а для нагрівань із температурою понад 700°C, що супроводжуються ЧР, газом із максимальним вмістом є  $C_2H_4$ . Теоретично в дану область можуть потрапляти значення, характерні для ЧР, що супроводжуються нагріваннями з температурою вище 700°C. Проте в розпорядженні авторів відсутні результати АРГ, які б були отримані із маслона-

повненого обладнання з такими дефектами.



**Рисунок 3.** Номограми, що відповідають ЧР, які супроводжуються нагріванням з температурою 300-700°C (а) і ЧР, які супроводжуються іскровими розрядами (б і в)

## VI. РОЗПІЗНАВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ РОЗРЯДІВ І ЇХ КОМБІНАЦІЙ З ТЕРМІЧНИМИ ДЕФЕКТАМИ

Для розпізнавання електричних розрядів та їх комбінацій із термічними дефектами запропоновано діапазони значень відношень газів, наведені у табл. 2. Цю таблицю використовують у тому разі, якщо значення відношення  $0,1 < CH_4/H_2 < 1$ . Тип дефекту визначається за значеннями відношень  $C_2H_4/C_2H_6$  та  $C_2H_2/C_2H_4$ . Залежно від отриманих значень відношень було виділено 7 різних діапазонів значень відношень газів, які дають змогу розпізнати 15 різних типів дефектів.

У більшості відомих стандартів і методик з інтерпретації результатів АРГ практично не регламентовані дефекти, для яких значення відношень  $0,1 < CH_4/H_2 < 1$ ,  $C_2H_4/C_2H_6 < 1$  і  $C_2H_2/C_2H_4 < 1$ . Більш того, у деяких стандартах (наприклад, [1], [4]) такі значення відношень газів відповідають справному стану обладнання за умови, що значення концентрацій і швидкостей наростання газів не перевищують граничних значень. Однак наявні в розпорядженні авторів результати АРГ, отримані в результаті співпраці з енергетичними компаніями України, а також численні результати АРГ, що наводяться у відкритих літературних джерелах, свідчать про наявність дефектів, для яких характерні наведені вище значення відношень газів.



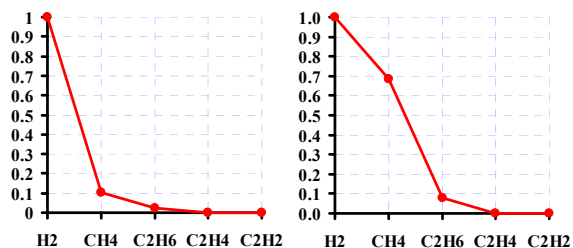
Таблиця 2. Визначення типу дефекту за допомогою пропонованого методу при  $0,1 < \text{CH}_4/\text{H}_2 < 1$

Тип дефекту	Значення відношень газів		
	$\text{CH}_4/\text{H}_2$	$\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$	$\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$
Часткові розряди (ЧР)	0,1-1	<1	<1
ЧР, що супроводжуються нагріваннями в діапазонах температур 150-300°C (ЧР+Т1)			
Нагрівання в діапазонах температур 150-300°C, що супроводжуються ЧР (Т1+ЧР)			
Нагрівання в діапазонах температур 150-300°C, що супроводжуються розрядами з низькою щільністю енергії (Т1+Р1)			
Розряди з низькою щільністю енергії, що супроводжуються нагріваннями в діапазонах температур 150-300°C (Р1+Т1)			
ЧР, що супроводжуються нагріваннями в діапазонах температур 300-700°C (ЧР+Т2)			
Розряди з низькою щільністю енергії, що супроводжуються нагріваннями в діапазонах температур 300-700°C (Р1+Т2)		1-4	<1
Нагрівання в діапазонах температур 300-700°C, що супроводжуються розрядами з низькою щільністю енергії (Т2+Р1)			
Іскрові та повзучі розряди			
Нагрівання в діапазонах температур понад 700°C, що супроводжуються розрядами з різною щільністю енергії (Т3+Р)		>1	>1
Розряди з різною щільністю енергії (Т3+Р)		>4	
Розряди з низькою щільністю енергії (Р1)		<2	
Розряди з високою щільністю енергії (Р2(C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> ))		<1	
Розряди з високою щільністю енергії, що супроводжуються нагріваннями в діапазонах температур 150-300°C (Р2+Т1)			
Нагрівання в діапазонах температур 300-700°C, що супроводжуються розрядами з високою щільністю енергії (Т2+Р2)			
Розряди з високою щільністю енергії, дугові розряди (Р2, дуга)	>2		

Незважаючи на те, що у більшості відомих стандартів і методиках наявність ЧР прогнозується, якщо значення відношення  $\text{CH}_4/\text{H}_2 < 0,1$ , у процесі експлуатації трапляються випадки, коли за наявності ЧР значення цього відношення перевищують 0,1. Номограма, характерна для таких ЧР, наведена на рис. 4 а.

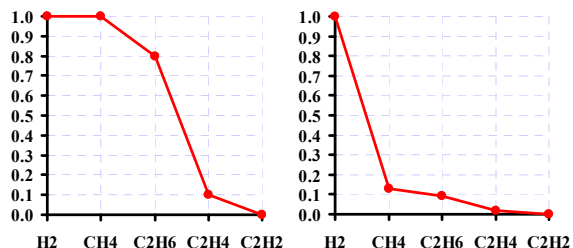
Як видно з рисунка, наведена номограма практично збігається з типовою для ЧР номограмою, яка регламентована в [1, 7, 8]. Відмінність наведеної на рис. 4 а номограми від регламентованої полягає у вищому вмісті  $\text{CH}_4$  по відношенню до  $\text{H}_2$ . У відкритих літературних джерелах такі дефекти ідентифікуються як або «Коронний розряд у маслі» [19, 20], або «ЧР» [21, 22], або «Розряди з низькою щільністю енергії» [23] і навіть «Низькотемпературне нагрівання» [24, 25]. В обладнанні з відносно низьким вмістом масла (як-от трансформатори струму та напруги, високовольтні маслонаповнені вводи), що заповнене маслом з високим вмістом парафінових фракцій, такі значення відношень газів свідчать про відкладення X-воску [26]. Виконаний аналіз показав, що такі ЧР було виявлено як у герметичному, так і негерметичному обладнанні. У зв'язку з цим відносно низький вміст  $\text{H}_2$  від-

носно  $\text{CH}_4$  не може бути пояснений тільки процесом дифузії  $\text{H}_2$  в атмосферу через його низьку розчинність у маслі, що є характерним для негерметичного обладнання. Скоріш за все такі ЧР супроводжуються незначним нагріванням, що і призводить до більш високого вмісту  $\text{CH}_4$ . ЧР, що супроводжуються низькотемпературним нагріванням (ЧР+Т1), прогнозується для маслонаповненого обладнання, в пробах масла якого спостерігається більш високий вміст  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$  і  $\text{C}_2\text{H}_4$ . Найхарактерніші номограми для таких дефектів представлено на рис. 4 б-к. Нагрівання у діапазоні температур 150-300°C, що супроводжується ЧР (Т1+ЧР), прогнозується коли в пробі масла газом із максимальним вмістом є  $\text{C}_2\text{H}_6$ , а номограми таких дефектів схожі з номограмою на рис. 4 к.



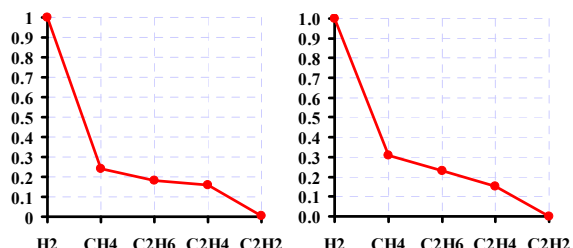
a

b



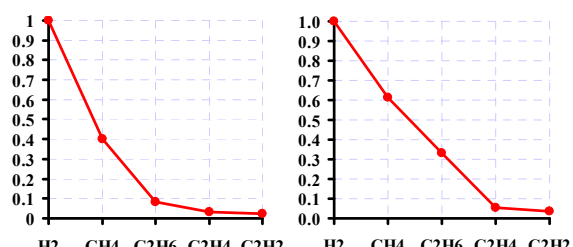
в

г



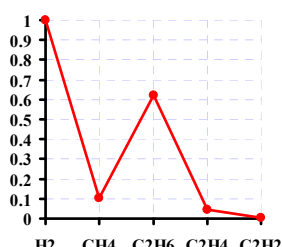
д

е



ж

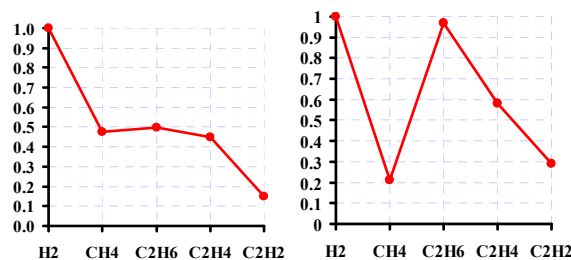
з



к

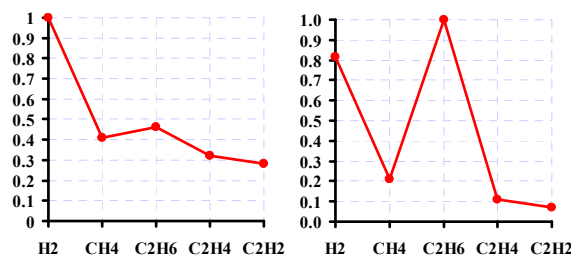
**Рисунок 4.** Номограми, що відповідають ЧР (а) і ЧР, що супроводжуються нагріванням з температурою 150-300°C (б-к)

У пробах масла з обладнання з розрядами, що супроводжуються нагріваннями в діапазоні температур 150-300°C (P1+T1) має місце більш високий вміст C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>. Для таких дефектів значення відношення C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>/C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>>0,1. Однак такі самі значення відношення C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>/C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> можуть мати місце і для інших дефектів. У зв'язку з цим для точнішого встановлення діагнозів рекомендується використовувати номограми, наведені на рис. 5 а-в. Для розпізнавання нагрівань у діапазоні температур 150-300°C, які супроводжуються розрядами (T1+P1) також рекомендується використовувати номограми, наведені на рис. 5 з і д.



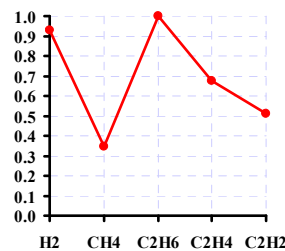
a

б



в

г



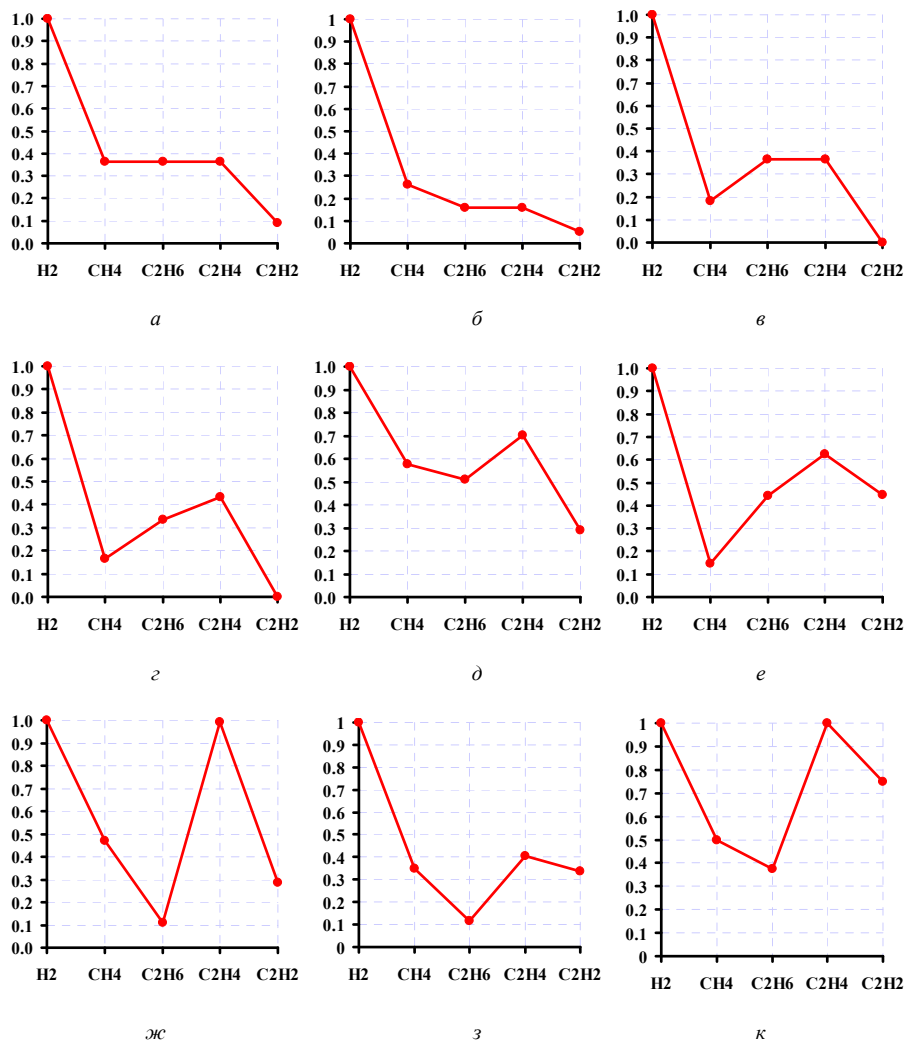
д

**Рисунок 5.** Номограми, що відповідають розрядам, які супроводжуються нагріванням з температурою 150-300°C (а-в), і нагріванням з температурою 150-300°C, які супроводжуються розрядами (з і д)

У маслонаповненому обладнанні, для якого значення відношень  $0,1 < CH_4/H_2 < 1$ ,  $1 < C_2H_4/C_2H_6 < 4$  та  $C_2H_2/C_2H_4 < 1$  можливою є присутність таких дефектів, як ЧР, що супроводжуються нагріванням в діапазоні температур 300-700°C (ЧР+T2), розряди, що супроводжуються нагріванням у діапазоні температур 300-700°C (P1+T2), нагрівання в діапазоні температур 300-

700°C, що супроводжуються розрядами (T2+P1), а також іскрові та повзучі розряди. Нагрівання в діапазоні температур 300-700°C, що супроводжуються розрядами (T2+P1), діагностують, якщо в пробі масла з

діагностованого обладнання газом із максимальним вмістом є C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>. Для розпізнавання решти дефектів рекомендується використовувувати номограми, наведені на рис. 6.



**Рисунок 6.** Номограми, що відповідають ЧР, які супроводжуються нагріванням у діапазоні температур 300-700°C (а-г), розрядам, що супроводжуються нагріванням у діапазоні температур 300-700°C (д та е), а також іскровим і повзучим розрядам (ж-к)

Наявність ЧР, що супроводжуються нагріванням у діапазоні температур 300-700°C, прогнозується якщо для діагностованого обладнання значення відношень газів перебувають у наступних діапазонах:  $0,1 < \text{CH}_4/\text{H}_2 < 1$ ,  $1 < \text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6 < 4$  та  $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4 < 1$ , а номограма, побудована за результатами АРГ, збігається з однією з номограм, наведених на рис. 6 а-г. Розряди, що супроводжуються нагріванням у діапазоні температур 300-700°C, діагностують у разі потрапляння значень відношень газів в аналізовану область і подібності номограми, побудованої за результатами експлуатаційних випробувань, до однієї з номограм, наведених на рис. 6 д та е. Крім того, для таких дефектів значення відношення  $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4 > 0,1$ . У чинному в Україні стандарті [1] для розпізнавання іскрових і

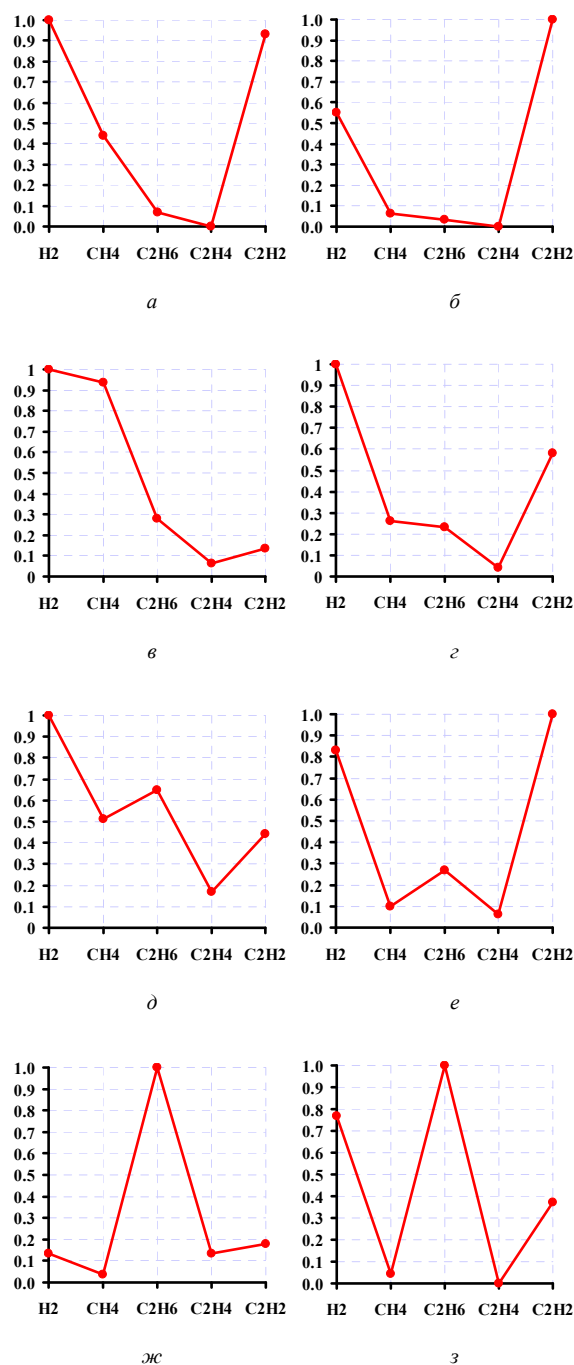
повзучих розрядів регламентовано такі відношення газів:  $0,1 < \text{CH}_4/\text{H}_2 < 1$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6 > 5$  і  $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4 < 1$ . Однак, як показано в [27], у процесі експлуатації іскрові розряди мали місце і за значень відношення  $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6 > 1$ . У зв'язку з цим іскрові та повзучі розряди прогноуються як у разі потрапляння точок в аналізований діапазон, так і в діапазон, для якого значення відношення  $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6 > 4$ , і при цьому експлуатаційна номограма збігається з однією із наведених на рис. 6 ж-к.

Області значень відношень  $0,1 < \text{CH}_4/\text{H}_2 < 1$ ,  $4 < \text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$  і  $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4 < 1$  відповідають два можливі типи дефектів – іскрові та повзучі розряди, а також нагрівання з температурою вище 700°C, які супроводжуються розрядами з різною щільністю енергії

(ТЗ+Р). Нагрівання з температурою вище 700°C, яке супроводжується розрядами з різною щільністю енергії, ставиться в разі, якщо в пробі масла з діагностованого обладнання газом з максимальним вмістом є  $C_2H_4$ . Дана обставина дає змогу розділити іскрові розряди і ТЗ+Р за критерієм ключового газу. Однак для уточнення енергії розрядів рекомендується використовувати номограми дефектів, наведені в [28].

Як і в попередніх випадках, у більшості чинних стандартів і методик не регламентовані дефекти, для яких значення відношень газів перебувають у діапазоні значень  $0,1 < CH_4/H_2 < 1$ ,  $C_2H_4/C_2H_6 < 1$  і  $C_2H_2/C_2H_4 > 1$ . Тобто значення відношень  $CH_4/H_2$  і  $C_2H_2/C_2H_4$  характерні для розрядів з низькою і високою щільністю енергії, а значення відношення  $C_2H_4/C_2H_6$  характерне для низькотемпературного нагрівання і ЧР. Докладний аналіз значень відношень газів, відсоткового вмісту газів, характерних номограм, а також найхарактерніших дефектів і причин їхньої появи наведено в [29], [30]. Виконаний аналіз отриманих у цих роботах результатів дав змогу виокремити 4 типи дефектів, для яких характерні ці значення відношень газів. Для уточнення типу дефекту рекомендується використовувати характерні номограми дефектів, які наведені на рис. 7.

Розряди з низькою щільністю енергії (P1) прогнозується в разі потрапляння значень відношень газів в аналізовану область і якщо в пробі масла з діагностованого обладнання газом із максимальним вмістом є  $H_2$ , а номограма дефекту має схожість із номограмою, що наведена на рис. 7 а. Наявність розрядів із високою щільністю енергії (P2 ( $C_2H_2$ )), діагностується в разі потрапляння значень відношень газів у відповідний діапазон, але водночас у пробі газом із максимальним вмістом є  $C_2H_2$ , а номограма дефекту має схожість із номограмою, наведеною на рис. 7 б. У цьому випадку має місце очевидне протиріччя між значеннями відношень газів, що вказують на розряди з низькою щільністю енергії, і ключовим газом  $C_2H_2$ , максимальний вміст якого характерний для розрядів з високою щільністю енергії. Рішення про наявність розрядів із високою щільністю енергії, що супроводжуються нагріванням у діапазоні температур 150-300°C (P2+T1), ухвалюють у разі потрапляння значень відношень газів у відповідний діапазон та схожістю номограми дефекту з однією із номограм, наведених на рис. 7 в-е. І нарешті, наявність нагрівань у діапазоні температур 150-300°C, що супроводжуються розрядами з високою щільністю енергії (T1+P2) діагностується в разі потрапляння значень відношень газів до цієї області, але водночас у пробі газом із максимальним вмістом є  $C_2H_6$ , а номограма дефекту має схожість із однією з номограм, наведених на рис. 7 ж та з.



**Рисунок 7.** Номограми, що відповідають розрядам з низькою щільністю енергії (а), розрядам з високою щільністю енергії (б), розрядам, що супроводжуються нагріванням з температурою 150-300°C (в-е), та нагріванням з температурою 150-300°C, що супроводжуються розрядами (ж та з)

Межі областей, характерних для розрядів з низькою (P1) і високою щільністю енергії (P2, дуга) практично збігаються з межами цих областей, регламентованих у міжнародному стандарті ІЕС 60599 [2], Зокрема область, характерну для розрядів з низькою щільністю енергії, обмежено такими значеннями від-

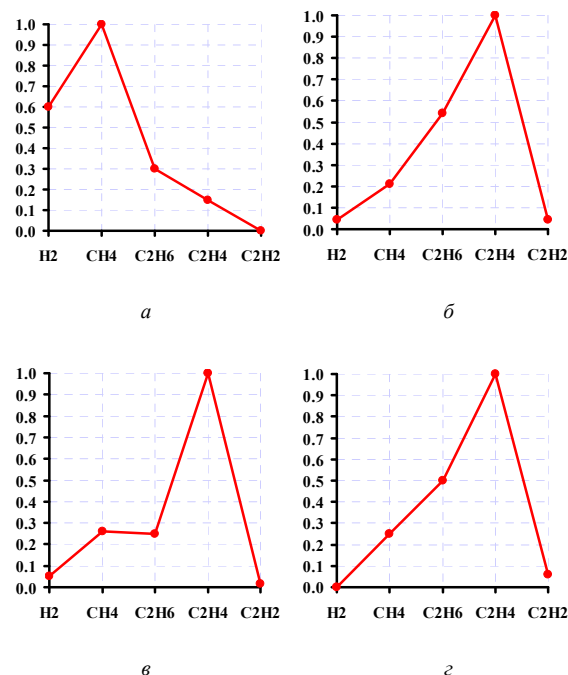
ношень:  $0,1 < \text{CH}_4/\text{H}_2 < 1$ ,  $1 < \text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6 < 2$  і  $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4 > 1$ . У разі якщо в пробі масла з діагностованого обладнання з такими відношеннями газів, газом з максимальним вмістом є  $\text{C}_2\text{H}_2$ , рекомендується діагностувати наявність розрядів з високою щільністю енергії (P2 ( $\text{C}_2\text{H}_2$ )). Область, характерна для розрядів з високою щільністю енергії і дугових розрядів, обмежена значеннями відношень  $0,1 < \text{CH}_4/\text{H}_2 < 1$ ,  $2 < \text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$  і  $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4 > 1$ .

## VII. РОЗПІЗНАВАННЯ ТЕРМІЧНИХ ДЕФЕКТІВ І ЇХ КОМБІНАЦІЙ З ЕЛЕКТРИЧНИМИ РОЗРЯДАМИ

Для розпізнавання нагрівань та їхніх комбінацій з електричними розрядами запропоновано діапазони значень відношень газів, наведені у табл. 3. Цю таблицю використовують у тому разі, якщо значення відношення  $\text{CH}_4/\text{H}_2 > 1$ . Тип дефекту визначається за значеннями відношень  $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$  та  $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$ . Залежно від отриманих значень відношень було виділено 9 різних діапазонів значень відношень газів, які дають змогу розпізнати 15 різних типів дефектів.

Як і в більшості відомих стандартів і методик з інтерпретації результатів АРГ, область, характерна для нагрівань у діапазоні температур 150-300°C (T1), обмежена значеннями відношень  $\text{CH}_4/\text{H}_2 > 1$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6 < 1$  і  $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4 < 0,1$ . Докладний аналіз значень відношень газів, відсоткового вмісту газів і характерних для низькотемпературних нагрівань номограм наведений у [31]. Такі ж значення відношень газів [30] можуть мати місце і при розвитку в обладнанні низькотемпературних нагрівань, які переходять у ЧР (T1+ЧР). Для розпізнавання T1+ЧР, рекомендується використовувати номограму, наведену на рис. 8 а. Область, характерна для нагрівань у діапазоні температур 300-700°C (T2), обмежена значеннями відношень  $\text{CH}_4/\text{H}_2 > 1$ ,  $1 < \text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6 < 4$  і  $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4 < 0,1$ , що також збігається з межами цього дефекту, які регламентуються в більшості відомих стандартів. Більш детальний аналіз значень відношень газів, відсоткового вмісту газів і характерних для нагрівань в діапазоні середніх температур номограм наведений у [32]. Як і в попередньому випадку, аналізовані значення відношень газів можуть зустрічатися не тільки за нагрівань в діапазоні середніх температур, а й за нагрівань, що переходять у ЧР або розряди з низькою щільністю енергії (T2+ЧР). Для таких дефектів характерна номограма, наведена на рис. 8 б. Наявність нагрівань із температурою понад 700°C (T3) прогнозується в разі потрапляння значень відношень газів у область, обмежену значеннями  $\text{CH}_4/\text{H}_2 > 1$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6 > 4$  та  $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4 < 0,2$ . Аналіз значень відношень газів, відсоткового вмісту газів і характерних для високотемпературних нагрівань номограм наведений у [33]. Такі ж значення відношень можливі й за розвитку високотемпературних нагрівань, що супроводжуються ЧР (T3+ЧР), і високотемпературних нагрівань, які переходять у розряди (T3+P1). Для розпізнавання таких

дефектів рекомендується використовувати номограми, наведені на рис. 8 в і з.



**Рисунок 8.** Номограми, що відповідають нагріванням у діапазоні температур 150-300°C, що переходять у ЧР (а), нагріванням у діапазоні температур 300-700°C, що переходять у ЧР або розряди з низькою щільністю енергії (б), нагріванням із температурою вище 700°C, що супроводжуються ЧР (в), та нагріванням із температурою вище 700°C, що переходять у розряди (з)

Наявність нагрівань у діапазоні температур 150-300°C, що супроводжуються розрядами з низькою щільністю енергії (T1+P1), діагностується в разі потрапляння значень відношень газів в область, обмежену значеннями відношень  $\text{CH}_4/\text{H}_2 > 1$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6 < 1$  та  $0,1 < \text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4 < 1$ . Аналогічно нагрівання в діапазоні температур 300-700°C, що супроводжуються розрядами з низькою щільністю енергії (T2+P1), прогноуються якщо значення відношення газів відповідають діапазону, обмеженому значеннями відношень  $\text{CH}_4/\text{H}_2 > 1$ ,  $1 < \text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6 < 4$  та  $0,1 < \text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4 < 1$ . Області, обмежені значеннями відношень  $\text{CH}_4/\text{H}_2 > 1$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6 > 4$  і  $0,2 < \text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4 < 1$  відповідають два можливих типи дефекту: нагрівання в діапазоні температур 300-700°C, що переходять у дугові розряди (T2+Дуга) та нагрівання із температурою вище 700°C, що супроводжуються розрядами з різною щільністю енергії (T3+P). Для T2+Дуга газом із максимальним вмістом є  $\text{CH}_4$ , а для T3+P газом із максимальним вмістом є  $\text{C}_2\text{H}_4$ . Високотемпературні нагрівання, що супроводжуються розрядами з високою щільністю енергії, прогноуються за значення відношення  $0,5 < \text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$  [28].

**Таблиця 3.** Визначення типу дефекту за допомогою пропонованого методу при  $CH_4/H_2 > 1$

Тип дефекту	Значення відношень газів		
	$CH_4/H_2$	$C_2H_4/C_2H_6$	$C_2H_2/C_2H_4$
Нагрівання в діапазонах температур 150-300°C (T1)	>1	<1	<0,1
Нагрівання в діапазонах температур 150-300°C, що супроводжуються ЧР (T1+ЧР)			
Нагрівання в діапазонах температур 300-700°C (T2)		1-4	
Нагрівання в діапазонах температур понад 700°C (T3)		>4	<0,2
Нагрівання в діапазонах температур понад 700°C, що супроводжуються ЧР (T3+ЧР)			
Нагрівання в діапазонах температур понад 700°C, що переходять у розряди (T3+P1)			
Нагрівання в діапазонах температур 150-300°C, що супроводжуються розрядами з низькою щільністю енергії (T1+P1)		<1	0,1-1
Нагрівання в діапазонах температур понад 700°C, що супроводжуються розрядами з різною щільністю енергії (T3+P)		>4	0,2-1
Нагрівання в діапазонах температур 300-700°C, що супроводжуються дуговими розрядами (T2+Дуга)			>0,2
Нагрівання в діапазонах температур 300-700°C, що супроводжуються розрядами з низькою щільністю енергії (T2+P1)		1-4	<1
Нагрівання в діапазонах температур 150-700°C, що супроводжуються розрядами з низькою щільністю енергії (T1+P2)		<1	
Розряди з високою щільністю енергії, що супроводжуються нагріваннями в діапазонах температур 150-300°C (P2+T1)		1-4	>1
нагрівання в діапазонах температур 300-700°C, що супроводжуються розрядами з високою щільністю енергії (T2+P2)			
Розряди з високою щільністю енергії, що супроводжуються нагріваннями в діапазонах температур 300-700°C (P2+T2)			
Розряди з високою щільністю енергії, що супроводжуються нагріваннями в діапазонах температур понад 700°C (P2+T3)		>4	

Області, обмежені значеннями відношень  $CH_4/H_2 > 1$ ,  $C_2H_4/C_2H_6 < 1$  і  $C_2H_2/C_2H_4 > 1$ , відповідає два можливих типи дефектів – нагрівання в діапазоні температур 150-300°C, що супроводжуються розрядами з високою щільністю енергії (T1+P2), для яких газами з максимальним вмістом є  $CH_4$  і  $C_2H_6$ , а також розряди з високою щільністю енергії, що супроводжуються низькотемпературними нагріваннями (P2+T1), для яких газом з максимальним вмістом є  $C_2H_2$ . Наявність нагрівань у діапазоні температур 300-700°C, що супроводжуються розрядами з високою щільністю енергії (T2+P2) та розрядів з високою щільністю енергії, що супроводжуються нагріваннями в діапазоні середніх температур (P2+T2), діагностуються за умови потрапляння значень відношень газів в область, обмежену значеннями відношень  $CH_4/H_2 > 1$ ,  $1 < C_2H_4/C_2H_6 < 4$  і  $C_2H_2/C_2H_4 > 1$ . T2+P2 діагностується у тому разі, якщо в пробі масла з діагностованого обладнання газом із максимальним вмістом є  $CH_4$ , а P2+T2 – якщо має місце максимальний вміст  $C_2H_2$ . Області, обмежені значеннями відношень  $CH_4/H_2 > 1$ ,

$C_2H_4/C_2H_6 > 4$  та  $C_2H_2/C_2H_4 > 1$ , також відповідають два типи дефектів – нагрівання у діапазоні температур 300-700°C, що супроводжуються дуговими розрядами (T2+Дуга) та розряди з високою щільністю енергії, що супроводжуються високотемпературними нагріваннями (P2+T3). Для T2+Дуга газом із максимальним вмістом є  $CH_4$ , а для P2+T3 газом із максимальним вмістом є  $C_2H_2$ .

#### VIII. ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ДОСТОВІРНОСТІ РОЗПІЗНАВАННЯ ТИПУ ДЕФЕКТУ З ВИКОРИСТАННЯМ ПРОПОНОВАНОГО МЕТОДУ

Для перевірки достовірності розпізнавання типу дефекту з використанням пропонованого методу були використані результати АРГ по 40 одиницями маслонаповненого обладнання з чітко встановленим типом дефекту (табл. 4). Ці результати не були використані під час розробки методу і були отримані авторами в результаті співпраці з електротехнічними лабораторіями України.



Таблиця 4. Результати АРГ обладнання з контрольної вибірки

№	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	Тип дефекту
1	0,2746	0,0192	0,0008	0,0001	0	ЧР
2	0,15	0,00346	0,00084	0,00004	0	ЧР
3	0,0908	0,00232	0,00024	0,00002	0	ЧР
4	0,095	0,0037	0,00136	0,0012	0	ЧР
5	0,0626	0,0046	0,0054	0,0031	0,0004	Корона і термічний розклад
6	0,063	0,005	0	0,012	0,0103	Іскріння
7	0,014315	0,001317	0,00084	0,000722	0,00423	Критичні ЧР
8	0,0283	0,0018	0,0006	0,0014	0,0036	Дуга та коронні розряди
9	0,0085	0,0013	0,0001	0,0001	0	Корона в маслі
10	0,14	0,1	0,0056	0,0012	0,0009	ЧР
11	0,0157	0,007	0,0034	0,0096	0,008	Повзучий розряд
12	0,006	0,00282	0,00065	0,00596	0,00171	Іскровий розряд високої інтенсивності
13	0,788	0,755	0,473	0,03	0,297	Розряди – пошкодження ізоляції
14	0,065	0,0081	0,017	0,0051	0,027	Розряди – поганий контакт екрана
15	0,0418	0,0056	0,0021	0,0014	0,0096	Дуга, корона і термічне розкладання
16	0,0345	0,011225	0,00275	0,00515	0,005875	Коротке замикання в обмотках
17	0,182	0,0405	0,0035	0,0365	0,0634	Коротке замикання між провідниками
18	0,1607	0,0615	0,008	0,0916	0,1294	Дуговий розряд
19	0,003	0,05	0,009	0,0006	0	Нагрівання пресувальних болтів потоками розсіювання
20	0,0096	0,0914	0,0435	0,0001	0,00005	Слабке нагрівання, розряди
21	0	0,02	0,018	0,009	0	Нагрівання ізоляції крайніх котушок
22	0,004	0,084	0,011	0,02	0	Нагрівання контактів селектора
23	0,0207	0,0441	0,0043	0,0224	0,0261	Нагрівання і розряди
24	0,022	0,024	0,0037	0,023	0,011	Нагрівання, що переходить в дугу
25	0,00155	0,00622	0,00827	0,00121	0	Нагрівання болтових з'єднань
26	0,1578	0,0758	0,3005	0,0001	0	ЧР
27	0,162	0,414	0,6056	0,0291	0,0968	Сліди мідних частинок, які зумовили пробій
28	0,0118	0,0122	0,013	0,002	0,0093	Нагрівання і дугові замикання
29	0,038	0,113	0,095	0,339	0	Середньотемпературне нагрівання
30	0,01045	0,01445	0,00156	0,01788	0,00056	Високотемпературне нагрівання
31	0	0,014	0,014	0,062	0,00027	Надмірне нагрівання осердя
32	0,0001	0,00005	0,00005	0,01292	0,00092	ТЗ і розряди великої потужності
33	0,0052	0,0045	0,0022	0,018	0,0011	Нагрівання, сліди розрядів
34	0	0,003	0,0028	0,018	0,002	ТЗ і розряд у маслі
35	0,00298	0,0022	0,00117	0,00908	0,00464	Стяжна шпилька зі слідами розрядів
36	0,0027	0,0016	0,0023	0,0127	0,0098	Іскріння, нагрівання та термічне розкладання целюлози
37	0,0063	0,005	0	0,012	0,103	Вигоряння контактів селектора
38	0,0082	0,0012	0,0002	0,002	0,0194	Обрив первинної обмотки
39	0,0007	0,0181	0,0082	0,1147	0,2883	Високоенергетична дуга, нагрівання
40	0,285	0,1115	0,0138	0,1987	0,3675	Коротке замикання у обмотках

Для кожного з аналізованих трансформаторів були встановлені діагнози з використанням норм і критеріїв, регламентованих різними стандартами і методиками, а також з використанням пропонованого методу. Далі виконувалося порівняння поставлених і реальних діагнозів. Після чого визначали кількість правильних і частково правильних діагнозів (правильно визначено тип дефекту, але помилково оцінено його інтенсивність – щільність розрядів або температуру), а також помилкових діагнозів і відмов від розпізнавання, тобто випадків, коли аналізований метод не дає змоги встановити діагноз. Результати аналізу наведено в табл. 5. У таблиці правильні діагнози позначені П, частково правильні – ЧП, помилкові – НП, а відмова від розпізнавання – В.

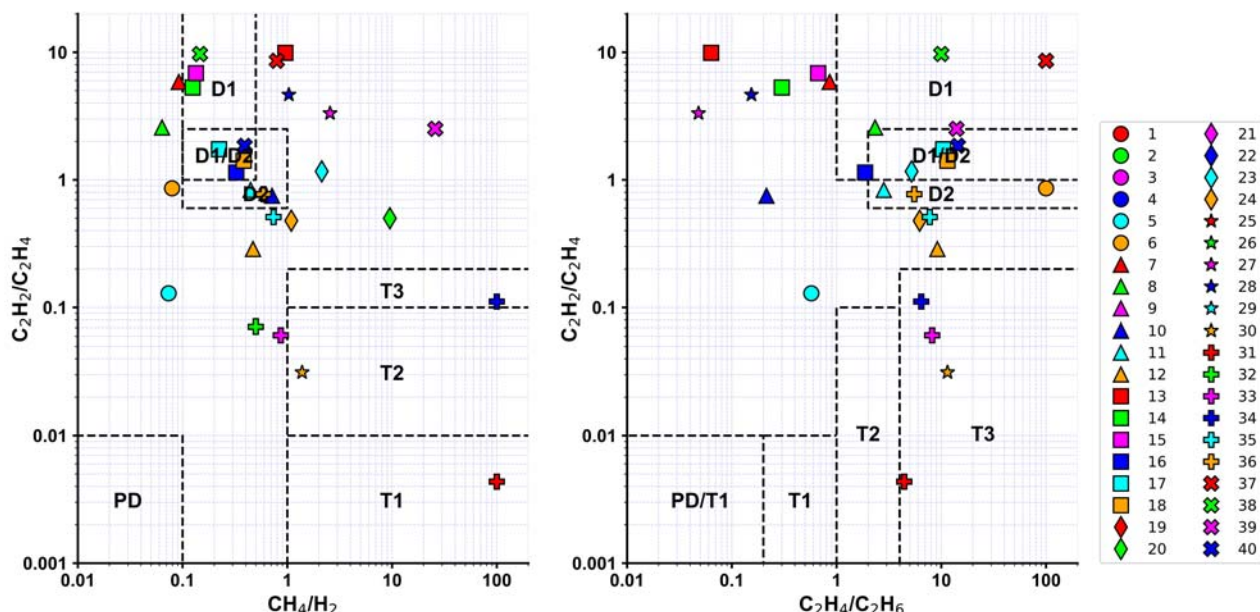
Також на рис. 9-11 наведено результати достовірності розпізнавання типу дефекту з використанням графічної інтерпретації відношень газів відповідно ІЕС 60599 [2] (рис. 9), Трикутника Дюваля [10] (рис. 10) і методу ETRA [7] (рис. 11).

Аналізуючи дані табл. 5, легко побачити, що ймовірність правильного розпізнавання типу дефекту з використанням норм і критеріїв, регламентованих у відомих стандартах і авторських методиках, становить близько 32,5% (без урахування методу MSS [5], який має найменшу вірогідність постановки правильного типу дефекту). При цьому відмову від розпізнавання було зафіксовано при використанні стандарту ІЕС 60599 [2] (рис. 9), а також методів Роджерса [4] і MSS [5]. У методі ETRA [7] (рис. 11) випадки відмови від розпізнавання обумовлені значенням концентрації  $C_2H_6$  нижче межі виявлення хроматографом. Слід також зазначити, що серед аналізованих стандартів і

методик лише Трикутник Дюваля [10], а також методи MSS [5] та ETRA [7] можуть розпізнавати дефекти комбінованого типу. Однак кількість таких дефектів обмежена. Водночас, як видно з табл. 5, використання пропонованого методу дало змогу поставити правильний діагноз для всієї контрольної вибірки, зокрема й для комбінованих дефектів, розпізнавання яких із використанням наявних методик викликає певні складнощі.

**Таблиця 5.** Результати аналізу достовірності розпізнавання типу дефекту з використанням різних стандартів і методик, а також пропонованого методу

Стандарт, метод	Достовірність розпізнавання (%)			
	П	ЧП	НП	В
Пропонований метод	100	—	—	—
ІЕС 60599 [2]	22,5	22,5	—	55
Метод Роджерса [4]	27,5	17,5	15	40
Метод MSS [5]	12,5	20	20	47,5
Трикутник Дюваля [10]	37,5	42,5	20	—
П'ятикутник Дюваля [11]	37,5	45	17,5	—
Метод ETRA [7]	40	35	20	5
П'ятикутник Мансупра [12]	27,5	50	22,5	—
Метод 2 графічних форм [13]	35	62,5	2,5	—
Квадрат 4 газів [9]	32,5	47,5	20	—



**Рисунок 9.** Результати достовірності розпізнавання типу дефекту з використанням графічної інтерпретації відношень газів відповідно ІЕС 60599 [2]

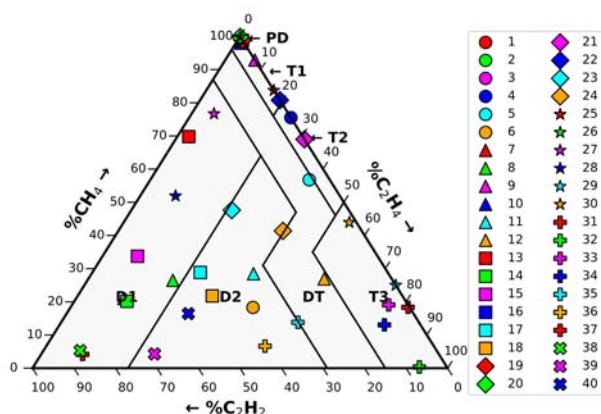


Рисунок 10. Результати достовірності розпізнавання типу дефекту з використанням Трикутника Дюваля [10]

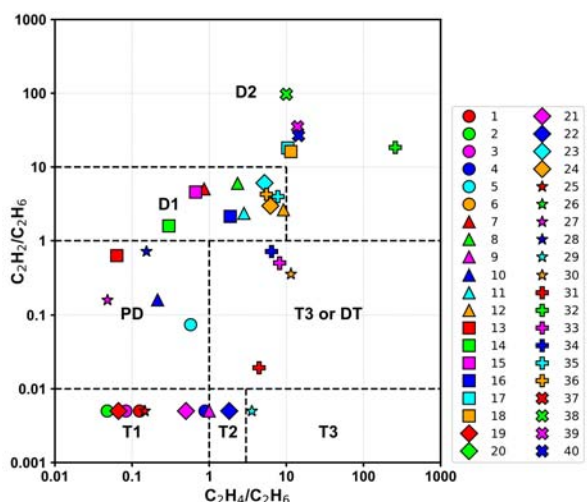


Рисунок 11. Результати достовірності розпізнавання типу дефекту з використанням методу ETRA [7]

## IX. ВИСНОВКИ

Запропоновано новий метод для розпізнавання типу дефекту маслонаповненого обладнання за результатами аналізу розчинених в маслі газів, що відрізняється від наявних можливістю розпізнати більшу кількість дефектів. Виконаний порівняльний аналіз достовірності розпізнавання типу дефекту на незалежній вибірці, показав суттєву перевагу запропонованого методу порівняно з наявними, зокрема можливість розпізнавання дефекту навіть у тих випадках, коли використання відомих методик не дає змоги поставити діагноз.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

[1] СОУ-Н ЕЕ 46.501:2006. Діагностика маслонаповненого трансформаторного обладнання за результатами хромато-графічного аналізу вільних газів, відібраних із газового реле, і газів, розчинених у ізоляційно-му маслі.

Методичні вказівки. – Вид. офіц. – Київ: Міністерство палива та енергетики України 2007. – 91 с.

- [2] IEC 60599:2015. Mineral oil-filled electrical equipment in service – Guidance on the interpretation of dissolved and free gases analysis. – Official edition. – Geneva, 2015. – 78 p.
- [3] Dörnenburg E. Monitoring oil-cooled transformers by gas analysis / E. Dörnenburg, W. Strittmater // Brown Boveri Review. – 1974. – Vol. 61. – P. 238–274.
- [4] Rogers R. IEEE and IEC Codes to Interpret Incipient faults in Transformers, Using Gas in Oil Analysis / R. Rogers // IEEE Trans. on Electrical Insulation. – 1978. – Vol. 5, № 38. – P. 349–354. doi: <https://doi.org/10.1109/TEI.1978.298141>.
- [5] Müller R. Die Beurteilung des Betriebszustandes von Transformatoren durch Gasanalyse / R. Müller, H. Schliesing, K. Soldner // Elektrizitätswirtschaft. – 1977. – No. 76. – P. 345–349.
- [6] Gouda O. E. Proposed three ratios technique for the interpretation of mineral oil transformers based dissolved gas analysis / Osama E. Gouda, Salah H. El-Hoshy, Hassan H. E.L.-Tamaly // IET Generation, Transmission & Distribution. – 2018. – Vol. 12, no. 11. – P. 2650–2661. – doi: <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2017.1927>.
- [7] Electric Technology Research Association. Conservation and control of oil-insulated components by diagnosis of gas in oil / Electric Technology Research Association. – 1980. – Vol. 36, no. 1.
- [8] Analyzing gases dissolved in oil and its application to maintenance of transformers / T. Kawamura [et al.] // International Conference on Large High Voltage Electric Systems, Paris, 27 April – 4 September 1986.
- [9] New methods of DGA diagnosis using IEC TC 10 and related databases Part 2: application of relative content of fault gases / Soo-jin Lee [et al.] // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2013. – Vol. 20, no. 2. – P. 691–696. – doi: <https://doi.org/10.1109/tdei.2013.6508774>.
- [10] Duval M. The duval triangle for load tap changers, non-mineral oils and low temperature faults in transformers / M. Duval // IEEE Electrical Insulation Magazine. – 2008. – Vol. 24, no. 6. – P. 22–29. – doi: <https://doi.org/10.1109/mei.2008.4665347>.
- [11] Duval M. The duval pentagon-a new complementary tool for the interpretation of dissolved gas analysis in transformers / M. Duval, L. Lamarre // IEEE Electrical Insulation Magazine. – 2014. – Vol. 30, no. 6. – P. 9–12. – doi: <https://doi.org/10.1109/mei.2014.6943428>.
- [12] Mansour D.-E. A. Development of a new graphical technique for dissolved gas analysis in power transformers based on the five combustible gases / Diaa-Eldin A. Mansour // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2015. – Vol. 22, no. 5. – P. 2507–2512. – doi: <https://doi.org/10.1109/tdei.2015.004999>.

- [13] Emara M. M. Two graphical shapes based on DGA for power transformer fault types discrimination / Manal M. Emara, Georgios D. Peppas, Ioannis F. Gonos // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. – 2021. – Vol. 28, no. 3. – P. 981–987. – doi: <https://doi.org/10.1109/tdei.2021.009415>.
- [14] Gouda O. E. Condition assessment of power transformers based on dissolved gas analysis / Osama E. Gouda, Salah H. El-Hoshy, Hassan H. E.L.-Tamaly // *IET Generation, Transmission & Distribution*. – 2019. – Vol. 13, no. 12. – P. 2299–2310. – doi: <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2018.6168>.
- [15] Ahmed M. R. Power transformer fault diagnosis using fuzzy logic technique based on dissolved gas analysis / M. R. Ahmed, M. A. Geliel, A. Khalil // 2013 21st Mediterranean Conference on Control & Automation (MED), Platanias, Chania - Crete, Greece, 25–28 June 2013. – P. 584–589. – doi: <https://doi.org/10.1109/med.2013.6608781>.
- [16] Zhang L. Fault diagnosis of power transformers using kernel based extreme learning machine with particle swarm optimization / Liwei Zhang, Jinsha Yuan // *Applied Mathematics & Information Sciences (AMIS)*. – 2015. – Vol. 9, no. 2. – P. 1003–1010.
- [17] Detection of DGA domains based on support vector machine / Yu Chen [et al.] // 2018 Third International Conference on Security of Smart Cities, Industrial Control System and Communications (SSIC), Shanghai, 18–19 October 2018. –doi: <https://doi.org/10.1109/ssic.2018.8556788>.
- [18] Hybrid RVM–ANFIS algorithm for transformer fault diagnosis / Jingmin Fan [et al.] // *IET Generation, Transmission & Distribution*. – 2017. – Vol. 11, no. 14. – P. 3637–3643. – doi: <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2017.0547>.
- [19] Duval M. A review of faults detectable by gas-in-oil analysis in transformers / M. Duval // *IEEE Electrical Insulation Magazine*. – 2002. – Vol. 18, no. 3. – P. 8–17. – doi: <https://doi.org/10.1109/mei.2002.1014963>.
- [20] Muhamad N. A. LabVIEW with fuzzy logic controller simulation panel for condition monitoring of oil and dry type transformer / N. A. Muhamad, S. A. M. Ali // *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering*. – 2008. – Vol. 2, no. 8. – P. 1685–1691. – doi: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1060253>.
- [21] Islam M. M. Application of Parzen Window estimation for incipient fault diagnosis in power transformers / Md Mominul Islam, Gareth Lee, Sujeewa Nilendra Hettiwatte // *High Voltage*. – 2018. – Vol. 3, no. 4. – P. 303–309. – doi: <https://doi.org/10.1049/hve.2018.5061>.
- [22] A transformer fault diagnosis model based on hybrid grey wolf optimizer and LS-SVM / Bing Zeng [et al.] // *Energies*. – 2019. – Vol. 12, no. 21. – P. 4170. – doi: <https://doi.org/10.3390/en12214170>.
- [23] Nemeth B. Condition monitoring of power transformers using DGA and Fuzzy logic / Balint Nemeth, Szilvia Laboncz, Istvan Kiss // 2009 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC) (Formerly EIC/EME), Montreal, QC, Canada, 31 May – 3 June 2009. – P. 373–376. – doi: <https://doi.org/10.1109/eic.2009.5166373>.
- [24] Bhalla D. Integrating AI based DGA fault diagnosis using Dempster–Shafer Theory / Deepika Bhalla, Raj Kumar Bansal, Hari Om Gupta // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. – 2013. – Vol. 48. – P. 31–38. – doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2012.11.018>.
- [25] Taha I. B. M. Optimal ratio limits of rogers' four-ratios and IEC 60599 code methods using particle swarm optimization fuzzy-logic approach / Ibrahim B. M. Taha, Ayman Hoballah, Sherif S. M. Ghoneim // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. – 2020. – Vol. 27, no. 1. – P. 222–230. – doi: <https://doi.org/10.1109/tdei.2019.008395>.
- [26] Shutenko O. Diagnosis of oil-filled equipment with x-wax deposition based on dissolved gas analysis / Oleg Shutenko, Oleksii Kulyk // 2021 IEEE 3rd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), Lviv, Ukraine, 26–28 August 2021. – P. 1–6. – doi: <https://doi.org/10.1109/ukrcon53503.2021.9575623>.
- [27] Kulyk O. S. Analysis of gas content in oil-filled equipment with spark discharges and discharges with high energy density / Oleksii Serhiiovych Kulyk, Oleg Volodymyrovych Shutenko // *Transactions on Electrical and Electronic Materials*. – 2019. – Vol. 20, no. 5. – P. 437–447. – doi: <https://doi.org/10.1007/s42341-019-00124-8>.
- [28] Shutenko O. Recognition of combined defects with high-temperature overheating based on the dissolved gas analysis / Oleg Shutenko, Oleksii Kulyk // *Sādhanā*. – 2022. – Vol. 47, no. 3. – P. 146. – doi: <https://doi.org/10.1007/s12046-022-01919-x>.
- [29] Shutenko O. Analysis of gas content in oil-filled equipment with low energy density discharges / Oleg Shutenko, Oleksii Kulyk // *International Journal on Electrical Engineering and Informatics*. – 2020. – Vol. 12, no. 2. – P. 258–277. – doi: <https://doi.org/10.15676/ijeei.2020.12.2.6>.
- [30] Shutenko O. Recognition of overheating with temperatures of 150–300°C by analysis of dissolved gases in oil / Oleg Shutenko, Oleksii Kulyk // 2020 IEEE 4th International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS), Istanbul, Turkey, 7–11 September 2020. – P. 71–76. – doi: <https://doi.org/10.1109/ieps51250.2020.9263145>.
- [31] Shutenko O. Recognition of low-temperature overheating in power transformers by dissolved gas analysis / Oleg Shutenko, Oleksii Kulyk // *Electrical Engineering*. – 2022. – Vol. 104, no. 4. – P. 2109–2121. – doi: <https://doi.org/10.1007/s00202-021-01465-5>.
- [32] Shutenko O. Recognition of mid-temperature overheating in high-voltage power transformers by dis-

solved gas analysis / Oleg Shutenko, Oleksii Kulyk // 2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek), Kharkiv, Ukraine, 13–17 September 2021. – P. 401–406. – doi: <https://doi.org/10.1109/khpiweek53812.2021.9570059>.

solved Gas Analysis / Oleg Shutenko, Oleksii Kulyk // 2021 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), Kremenchuk, Ukraine, 21–24 September 2021. – P. 1–6. – doi: <https://doi.org/10.1109/mees52427.2021.9598575>.

[33] Shutenko O. Recognition of High-Temperature Overheating in High-Voltage Power Transformers by Dis-

Стаття надійшла до редакції 28.08.2023

## ANALYTICAL METHOD OF IDENTIFYING THE TYPE OF DEFECT OF OIL-FILLED EQUIPMENT ACCORDING TO THE RESULTS OF ANALYSIS OF GASES DISSOLVED IN OIL

SHUTENKO O.V. Ph.D, Associate professor, Associate professor of the electric power transmission department of the National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: [o.v.shutenko@gmail.com](mailto:o.v.shutenko@gmail.com);

KULYK O.S. PhD Student of the electric power transmission department of the National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: [oleksii.kulyk@ieec.khpi.edu.ua](mailto:oleksii.kulyk@ieec.khpi.edu.ua);

**Purpose.** Development of a method for recognizing the type of defect of oil-filled equipment based on the results of the analysis of gases dissolved in oil.

**Methodology.** Analysis of gas ratio values in oil-filled equipment with various types of defects, synthesis of a method for recognizing the type of defects.

**Findings.** A description of the analytical method for recognising the type of defects in oil-filled equipment based on the results of the dissolved gases analysis is given. To recognise the type of defect, the values of three ratios are used:  $CH_4/H_2$ ,  $C_2H_4/C_2H_6$ , and  $C_2H_2/C_2H_4$ . Using these ratios, 40 different types of defects and their combinations can be recognised. These defects correspond to 25 different ranges of gas ratios obtained as a result of gas content studies for 3715 units of oil-filled equipment. The type of defect is determined by analysing the obtained gas ratio values and classifying them according to the ranges of gas ratios for each fault. In the case when the obtained ratio values correspond to several types of faults in the same range, characteristic nomograms of defects and recommendations according to the key gas method are used to clarify the type of fault. A comparative analysis of the reliability of fault type recognition using the developed method and some well-known methods for interpreting the results of dissolved in oil gases analysis was performed.

**Originality.** An analytical method for recognising the type of faults in oil-filled equipment of electrical networks based on the results of the dissolved gases analysis is proposed. This method differs from the existing ones in that, when using three known gas ratios, it allows recognising a larger number of defects of different types (40), including those for which the known methods do not allow establishing a diagnosis. This result is ensured by the use of 25 ranges of gas ratios obtained from the results of gas content studies for 3715 units of oil-filled equipment.

**Practical value.** The use of the developed method for recognising the type of faults in oil-filled equipment of electrical networks allows increasing the reliability of defect recognition based on the results of dissolved gases analysis. This, in turn, makes it possible to increase the operational reliability of electric power equipment and extend the service life of this equipment.

**Keywords:** equipment diagnostics; dissolved gas analysis (DGA); analytical method; fault type recognition; gas ratio; analysis of recognition reliability.

### REFERENCES

- [1] Diahnostyka maslonapovnenoho transformatornoho obladnannia za rezultatamy khromatohrafichnoho analizu vilnykh haziv, vidibranykh iz hazovoho rele, I haziv, rozchynenykh u izoliatsiinomu masli. Metodychni vkazivky [Diagnosis of oil-filled transformer equipment by chromatographic analysis of free gases sampled from the gas relay and gases dissolved in the insulating oil. Methodological guidelines] (SOU-NEE 46.501:2006). (2007). Ministry of Fuel and Energy of Ukraine. (in Ukrainian)
- [2] International Electrotechnical Commission. (2015). Mineral oil-filled electrical equipment in service – Guidance on the interpretation of dissolved and free gases analysis (IEC 60599:2015).
- [3] Dörnenburg, E., & Strittmater, W. (1974). Monitoring oil-cooled transformers by gas analysis. *Brown Boveri Review*, 61, 238–274.
- [4] Rogers, R. (1978). IEEE and IEC codes to interpret incipient faults in transformers, using gas in oil analysis. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, EI-13(5), 349–354. <https://doi.org/10.1109/tei.1978.298141>
- [5] Müller, R., Schliesing, H., & Soldner, K. (1977). Die

- Beurteilung des Betriebszustandes von Transformatoren durch Gasanalyse. *Elektrizitätswirtschaft*, (76), 345–349.
- [6] Gouda, O. E., El-Hoshy, S. H., & E.L.-Tamaly, H. H. (2018). Proposed three ratios technique for the interpretation of mineral oil transformers based dissolved gas analysis. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 12(11), 2650–2661. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2017.1927>
- [7] Electric Technology Research Association. (1980). Conservation and control of oil-insulated components by diagnosis of gas in oil. 36(1).
- [8] Kawamura, T., Kawada, H., Ando, K., Yamaoka, M., Maeda, T., & Takatsu, T. (1986). Analyzing gases dissolved in oil and its application to maintenance of transformers. In *International Conference on Large High Voltage Electric Systems*.
- [9] Lee, S.-j., Kim, Y.-m., Seo, H.-d., Jung, J.-r., Yang, H.-j., & Duval, M. (2013). New methods of DGA diagnosis using IEC TC 10 and related databases Part 2: Application of relative content of fault gases. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 20(2), 691–696. <https://doi.org/10.1109/tdei.2013.6508774>
- [10] Duval, M. (2008). The duval triangle for load tap changers, non-mineral oils and low temperature faults in transformers. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 24(6), 22–29. <https://doi.org/10.1109/mei.2008.4665347>
- [11] Duval, M., & Lamarre, L. (2014). The duval pentagon—a new complementary tool for the interpretation of dissolved gas analysis in transformers. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 30(6), 9–12. <https://doi.org/10.1109/mei.2014.6943428>
- [12] Mansour, D.-E. A. (2015). Development of a new graphical technique for dissolved gas analysis in power transformers based on the five combustible gases. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 22(5), 2507–2512. <https://doi.org/10.1109/tdei.2015.004999>
- [13] Emara, M. M., Peppas, G. D., & Gonos, I. F. (2021). Two graphical shapes based on DGA for power transformer fault types discrimination. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 28(3), 981–987. <https://doi.org/10.1109/tdei.2021.009415>
- [14] Gouda, O. E., El-Hoshy, S. H., & E.L.-Tamaly, H. H. (2019). Condition assessment of power transformers based on dissolved gas analysis. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 13(12), 2299–2310. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2018.6168>
- [15] Ahmed, M. R., Geliel, M. A., & Khalil, A. (n.d.). Power transformer fault diagnosis using fuzzy logic technique based on dissolved gas analysis. In *2013 21st Mediterranean Conference on Control & Automation (MED)* (p. 584–589). <https://doi.org/10.1109/med.2013.6608781>
- [16] Zhang, L., & Yuan, J. (2014). Fault diagnosis of power transformers using kernel based extreme learning machine with particle swarm optimization. *Applied Mathematics & Information Sciences* (AMIS), 9(2), 1003–1010.
- [17] Chen, Y., Yan, S., Pang, T., & Chen, R. Detection of DGA domains based on support vector machine. In *2018 Third International Conference on Security of Smart Cities, Industrial Control System and Communications* (SSIC). <https://doi.org/10.1109/ssic.2018.8556788>
- [18] Fan, J., Wang, F., Sun, Q., Bin, F., Liang, F., & Xiao, X. (2017). Hybrid RVM–ANFIS algorithm for transformer fault diagnosis. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 11(14), 3637–3643. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2017.0547>
- [19] Duval, M. (2002). A review of faults detectable by gas-in-oil analysis in transformers. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 18(3), 8–17. <https://doi.org/10.1109/mei.2002.1014963>
- [20] Muhamad, N. A., & Ali, S. A. M. (2008). LabVIEW with fuzzy logic controller simulation panel for condition monitoring of oil and dry type transformer. *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering*, 2(8), 1685–1691. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1060253>
- [21] Islam, M. M., Lee, G., & Hettiwatte, S. N. (2018). Application of Parzen Window estimation for incipient fault diagnosis in power transformers. *High Voltage*, 3(4), 303–309. <https://doi.org/10.1049/hve.2018.5061>
- [22] Zeng, B., Guo, J., Zhu, W., Xiao, Z., Yuan, F., & Huang, S. (2019). A transformer fault diagnosis model based on hybrid grey wolf optimizer and LS-SVM. *Energies*, 12(21), Article 4170. <https://doi.org/10.3390/en12214170>
- [23] Nemeth, B., Laboncz, S., & Kiss, I. (n.d.). Condition monitoring of power transformers using DGA and Fuzzy logic. In *2009 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC) (Formerly EIC/EME)* (p. 373–376). <https://doi.org/10.1109/eic.2009.5166373>
- [24] Bhalla, D., Bansal, R. K., & Gupta, H. O. (2013). Integrating AI based DGA fault diagnosis using Dempster–Shafer Theory. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 48, 31–38. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2012.11.018>
- [25] Taha, I. B. M., Hoballah, A., & Ghoneim, S. S. M. (2020). Optimal ratio limits of rogers' four-ratios and IEC 60599 code methods using particle swarm optimization fuzzy-logic approach. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 27(1), 222–230. <https://doi.org/10.1109/tdei.2019.008395>
- [26] Shutenko, O., & Kulyk, O. Diagnosis of oil-filled equipment with x-wax deposition based on dissolved



- gas analysis. In 2021 IEEE 3rd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON) (p. 1–6). <https://doi.org/10.1109/ukrcon53503.2021.9575623>
- [27] Kulyk, O. S., & Shutenko, O. V. (2019). Analysis of gas content in oil-filled equipment with spark discharges and discharges with high energy density. *Transactions on Electrical and Electronic Materials*, 20(5), 437–447. <https://doi.org/10.1007/s42341-019-00124-8>
- [28] Shutenko, O., & Kulyk, O. (2022). Recognition of combined defects with high-temperature overheating based on the dissolved gas analysis. *Sādhana*, 47(3), Article 146. <https://doi.org/10.1007/s12046-022-01919-x>
- [29] Shutenko, O., & Kulyk, O. (2020). Analysis of gas content in oil-filled equipment with low energy density discharges. *International Journal on Electrical Engineering and Informatics*, 12(2), 258–277. <https://doi.org/10.15676/ijeei.2020.12.2.6>
- [30] Shutenko, O., & Kulyk, O. Recognition of overheating with temperatures of 150-300°C by analysis of dissolved gases in oil. In 2020 IEEE 4th International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS) (p. 71–76). <https://doi.org/10.1109/ieps51250.2020.9263145>
- [31] Shutenko, O., & Kulyk, O. (2022). Recognition of low-temperature overheating in power transformers by dissolved gas analysis. *Electrical Engineering*, 104(4), 2109–2121. <https://doi.org/10.1007/s00202-021-01465-5>
- [32] Shutenko, O., & Kulyk, O. Recognition of mid-temperature overheating in high-voltage power transformers by dissolved gas analysis. In 2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPI-Week) (p. 401–406). <https://doi.org/10.1109/khpiweek53812.2021.9570059>
- [33] Shutenko, O., & Kulyk, O. Recognition of High-Temperature Overheating in High-Voltage Power Transformers by Dissolved Gas Analysis. In 2021 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES) (p. 1–6). <https://doi.org/10.1109/mees52427.2021.9598575>