ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Науковий журнал

ЕЛЕКТРОТЕХНІКА
та
ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА

№2’2017

Засновано Запорізьким національним технічним університетом
у травні 1999 року

Виходить 4 рази на рік

Запоріжжя

2017

ISSN 1607-6761 (Print)
ISSN 2521-6244 (Online)

«ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА»

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

ЗАКОРДОННІ ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ

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, Кардіффський університет, Кардіфф, 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 № 1328 від 21.12.2015р.)

ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ (Україна)

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

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

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

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

Видавець: Запорізький національний технічний університет, м. Запоріжжя. Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК №2394 від 27.12.2005р.

Реєстрація журналу: Журнал зареєстровано у Міністерстві юстиції України. Свідоцтво про державну реєстрацію КВ №6905 від 29.01.2003р.

Адреса редакції: Редакційно-видавничий відділ. Запорізький національний технічний університет, вул. Жуковського, 64, м. Запоріжжя, 69063, Україна. Телефон:+380(61)769-82-96 Факс: (061) 764-21-41 e-mail: rvv@zntu.edu.ua.
Електрона 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 28.12.2017 за рекомендацією вченої ради Запорізького національного технічного університету (протокол №5 від 28.12.2017 р.). Формат 60х84/8. Ум. Др. Арк. 11,16. Тираж 300 прим. Зам. №1134

© Запорізький національний технічний університет, 2017

ZAPORIZHZHIA NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY

Scientific journal

ELECTRICAL ENGINEERING & POWER ENGINEERING

№2’2017

Founded by Zaporizhzhia National Technical University in May 1999

4 issues per year

Zaporizhzhia

2017

ISSN 1607-6761 (Print)
ISSN 2521-6244 (Online)

«ELECTRICAL ENGINEERING & POWER ENGINEERING»

Editor-in-chief Prof., Sc.D. DmitroYarymbash

Associate Editor-in-chief Assoc. prof., Sci.D., Sergiy Tihovod

Senior secretary Assoc. prof., Ph.D. Mikhailo Kotsur

The journal has been included scientific professional editions of Ukraine (Order of the Ministry of Education and Science № 1328 dated 21.12.2015)

FOREIGN MEMBERS OF EDITIONAL BOARD

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

MEMBERS OF EDITIONAL 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", Khrarkiv, Ukraine; **A. V. Zhyltsov**, 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 National Technical University, Zaporizhzhia, Ukraine; **V.V. Zinovkin**, Sc.D., prof., Zaporizhzhia National Technical 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 National Technical University, Zaporizhzhia, Ukraine; **S. T. Yarymbash**, Ph.D, assoc. prof., Zaporizhzhia National Technical University, Zaporizhzhia, Ukraine; **G. M. Shilo**, Sci.D., assoc. prof., Zaporizhzhia National Technical University, Zaporizhzhia, Ukraine; **N. I. Furmanova**, Ph.D., assoc. prof., Zaporizhzhia National Technical University, Zaporizhzhia, Ukraine; **A. V. Parkhomenko**, Ph.D., assoc. prof., Zaporizhzhia National Technical 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, Khmelnitsky, Ukraine; **V. V. Kochan**, Ph.D., assoc. prof., Ternopil National Economic University, Ternopil, Ukraine; **L. S. Globa**, Sc.D. prof., Kyiv Polytechnic National Technical University, Kyiv, Ukraine; **M. A. Skulish**, Ph.D., assoc. prof., Kyiv Polytechnic National Technical University, Kyiv, Ukraine;

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

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

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

Founder and editor: Zaporizhzhia National Technical University, Zaporozhia. Certificate of publisher Civil Code №2394 dated 27.12.2005.

Journal was registrated: by the Ministry of Justice of Ukraine. Registration number KV № 6905 dated January 29, 2003.

Address of editor and editorial office: Zaporizhzhya National Technical 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 December 28, 2017 on the recommendation of the academic council of the Zaporizhzhia National Technical University (Protocol No. 5 dated December 28, 2017). Sheet size 60x84/8. Cond. Print. Sheets 11,16. Number of copies printed 300. Rep. № 1134

© Zaporizhzhia National Technical University, 2017

ЗМІСТ

I ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

Зіновкін В. В., Антонов М. Л., Крисан Ю. О.
ВПЛИВ НЕСТАЦІОНАРНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ НА ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ ПАРАМЕТРИ У СИНХРОННОМУ ЕЛЕКТРОПРИВОДІ.....8

Зірка С. Є., Мороз Ю. І., Артурі Ц. М., Боннман Д.
ТОПОЛОПЧНІ МОДЕЛІ ТРИФАЗНОГО П'ЯТИСТРИЖНЕВОГО ТРАНСФОРМАТОРА.....20

Волков В. О.
АНІЛІТИЧНИЙ РОЗРАХУНОК ОСНОВНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ВТРАТ ЕНЕРГІЇ ЧАСТОТНОРЕГУЛЬОВАНОГО ДВИГУНА ПРИ ПОЗИЦІЮВАННІ.....28

Мацуй А. М., Кондратець В.О.
ТЕОРЕТИЧНЕ І ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ МАГНІТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СИСТЕМИ, ЩО СПРИЙМАЄ КРУПНІСТЬ ПІСКІВ ОДНОСПІРАЛЬНОГО КЛАСИФІКАТОРА.....40

Паталах Д. Г., Тиховод С. М., Корнус Т. М.
ЧИСЛОВИЙ БЕЗІТЕРАЦІЙНИЙ МЕТОД МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПРОЦЕСІВ В АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ.....52

Дивчук Т. Є., Яримбаш Д. С., Яримбаш С. Т., Килимник І. М., Коцур М. І., Безверхня Ю.
ПІДХІД ДО ВИЗНАЧЕННЯ СТРУМІВ НЕРОБОЧОГО ХОДУ СИЛОВИХ ТРИФАЗНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ З ПЛОСКИМ СТРИЖНЕВИМИ МАГНІТНИМИ СИСТЕМАМИ.....58

II ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА

Лаврич Ю. М., Погоріла Л. М., Подчасов А. Ю.
МЕТОДОЛОГІЧНИЙ ПІДХІД ДО ПОБУДОВИ ЕНЕРГООЩАДНОЇ СИСТЕМИ АВАРІЙНОГО ОСВІТЛЕННЯ.....69

Шутенко О. В.
АНАЛІЗ ДИНАМІКИ ЗМІНИ КРИТЕРІЇВ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ ДЛЯ ІНТЕРПРЕТАЦІЇ РЕЗУЛЬТАТІВ АРГ, У СПРАВНИХ ВИСОКО-ВОЛЬТНИХ ТРАНСФОРМАТОРАХ НЕГЕРМЕТИЧНОГО ВИКОНАННЯ.....76

Лобов В. Й., Лобова К. В., Даць А. В.
УПРАВЛІННЯ ГАЗОПОВІТРЯНОЮ ЕНЕРГЕТИЧНОЮ УСТАНОВКОЮ ПРОМИСЛОВОГО ПІДПРИЄМСТВА.....86

СОДЕРЖАНИЕ

I ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Зиновкин В. В., Антонов Н. Л., Крисан Ю.А.
ВЛИЯНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ НА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ В СИНХРОННОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ.....8

Зирка С. Е., Мороз Ю. И., Артури Ц. М., Боннман Д.
ТОПОЛОГИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ТРЕХФАЗНОГО ПЯТИСТЕРЖНЕВОГО ТРАНСФОРМАТОРА.....20

Волков В. А.
АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ ЧАСТОТНОРЕГУЛИРУЕМОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИИ.....28

Мацуй А. Н., Кондратец В. А.
ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ, КОТОРАЯ ВОСПРИНИМАЕТ КРУПНОСТЬ ПЕСКОВ ОДНОСПИРАЛЬНОГО КЛАССИФИКАТОРА.....40

Паталах Д. Г., Тиховод С. М., Корнус Т. М.
ЧИСЛЕННЫЙ БЕЗЫТЕРАЦИОННЫЙ МЕТОД МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЯХ.....52

Дивчук Т. Е., Ярымбаш Д. С., Ярымбаш С. Т., Килимник И. М., Коцур М. И., Безверхняя Ю.
ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ТОКОВ ХОЛОСТОГО ХОДА СИЛОВЫХ ТРЕХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ С ПЛОСКИМИ СТЕРЖНЕВЫМИ МАГНИТНЫМИ СИСТЕМАМИ.....58

II ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

Лаврич Ю. Н., Погорелая Л. М., Подчасов А. Ю.
МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ПОСТРОЕНИЮ ЭНЕРГОСБЕРГАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ АВАРИЙНОГО ОСВЕЩЕНИЯ.....69

Шутенко О. В.
АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ИЗМЕНЕНИЯ КРИТЕРИЕВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ДЛЯ ИНТЕРПРЕТАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ АРГ, В ИСПРАВНЫХ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ТРАНСФОРМАТОРАХ НЕГЕРМЕТИЧНОГО ИСПОЛНЕНИЯ.....76

Лобов В. И., Лобова К. В., Даць А. В.
УПРАВЛЕНИЕ ГАЗОВОЗДУШНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКОЙ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ.....86

CONTENTS

I ELECTRICAL ENGINEERING

Zinovkin V., Antonov N., Krysan Yu.
INFLUENCE OF NON-STATIONARY ELECTROMAGNETIC PROCESSES ON ELECTROMECHANICAL PARAMETERS IN A SYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE.....8

Zirka S. E., Moroz Y. I., Arturi C. M., Bonnman D.
TOPOLOGICAL TRANSIENT MODELS OF THREE-PHASE FIVE-LIMB TRANSFORMER.....20

Volkov V. A.
ANALYTICAL CALCULATION OF THE BASIC ELECTROMAGNETIC LOSSES OF THE ENERGY OF THE FREQUENCY-REGULATED ASYNCHRONOUS ENGINE IN POSITIONING.....28

Matsui A. N., Kondratets V. A.
THEORETICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE MAGNETOELECTRIC SYSTEM, WHICH RECOGNIZES THE LARGE OF SUNS OF A SINGLE-SPIRAL CLASSIFIER.....40

Patalakh D., Tykhovod S., Kornus T.
NUMERICAL WITHOUT ITERATION METHOD OF MODELING OF ELECTROMECHANICAL PROCESSES IN ASYNCHRONOUS ENGINES.....52

Divchuk T. E., Yarymbash D.S., Yarymbash S.T., Kylymnyk I. M., Kotsur M. I., Bezverkhnia Y.
APPROACH TO DETERMINATION OF NO LOAD CURRENT OF THREE-PHASE POWER TRANSFORMERS WITH PLANE RODS MAGNETIC SYSTEMS.....58

II POWER ENGINEERING

Lavrich Yu. N., Pogorelaya L. M., Podchasov A. Yu.
THE METHODOLOGICAL APPROACH FOR CONSTRUCTION OF ENERGY-EFFICIENT EMERGENCY LIGHTING SYSTEM.....69

Shutenko O. V.
THE ANALYSIS OF THE DYNAMICS OF CHANGE OF CRITERIA USED FOR INTERPRETATION OF DGA RESULTS, IN CORRECT HIGH-VOLT TRANSFORMERS OF NON-GERMETIC EXECUTION.....76

Lobov V. Y., Lobova K. V., Dats A. V.
MANAGEMENT OF GAS-AIR ENERGY INSTALLATION OF INDUSTRIAL ENTERPRISE.....86

УДК 621.313.323

ВЛИЯНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ НА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ В СИНХРОННОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ

ЗИНОВКИН В.В. д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина, *e-mail: zvv@zntu.edu.ua;*

АНТОНОВ Н.Л. канд. техн. наук, доцент кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина, *e-mail: nick@nickanto.info;*

КРИСАН Ю.А. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина, *e-mail: krisan@mail.com.*

Цель работы. *Исследование влияния резкопеременной электрической нагрузки на нестационарные электромагнитные явления и электромеханические процессы в синхронном электроприводе.*

Методы исследования. *Теоретические и экспериментальные методики исследований и анализа совокупности параметров резкопеременных нагрузок электротехнологических комплексов и электромагнитных процессов в электрооборудовании; физико-аналитические методики для получения зависимостей влияния электротехнологических нагрузок на техническое состояние, аварийность электрооборудования, добавочные потери и нестационарных электромагнитных явлений в системах и оборудовании.*

Полученные результаты. *Выполнены расчеты превышения колебательных процессов вала синхронного электропривода, которые возбуждаются резкопеременными нагрузками, относительно нормированных государственными стандартами. Исходя из первостепенных требований электропривода и обеспечения нормируемых колебаний вала двигателя и возрастающих требований к надежности, эффективности и снижения энергозатрат на единицу вырабатываемой продукции было исследовано влияние нестационарных электромагнитных процессов на электромеханические параметры электропривода.*

Научна новизна. *Предложена математическая методика нестационарных электромагнитных процессов в синхронном электроприводе, которая позволяет исследовать влияние несинусоидальности и несимметрии токов и напряжений на электромеханические параметры. Приведена инженерная методика оценки колебательной функции вала в зависимости от характера нестационарных электромагнитных процессов в синхронном электродвигателе.*

Практическая ценность. *Предложена инженерная методика оценки колебаний вала синхронного электропривода при нестационарных электромагнитных процессах, приводящих к увеличению показателей нормативно-технической документации.*

Ключевые слова: *нестационарные электромагнитные процессы; синхронный электропривод; резкопеременная нагрузка математическая модель; механические колебания; нормируемые показатели.*

I. ВВЕДЕНИЕ

Электроприводы широко используются в технологических установках общего и специального назначения. При их помощи достигается высокая точность, оперативность и обеспечиваются директивные электромеханические процессы промышленных установок. Их эффективность существенно зависит от соблюдения нормированных показателей качества электрической энергии и условий эксплуатации [1]-[3]. Ввиду особенностей электротехнологических режимов энергоемких технологических комплексов таких как приводы прокатных станов и дуговые сталеплавильные печи, вставки и линии передачи постоянного тока, электролиза и нефтеперерабатывающей промышленности и др. ток и напряжение изменяются во времени по резкопеременному вероятностному закону [4]-[6]. Это приводит к существенному превышению нормируемых показателей качества электрической энергии и, как следствие, формированию нестационарных электромагнитных явлений в электроприводах и смежном электротехническом оборудовании [7], [8]. Последние являются причиной ухудшения технико-экономических показателей энергоемких промышленных предприятий в результате следующих явлений и последствий:

- увеличения добавочных потерь в электроприводе и технологической линии;
- развития релаксационных электромеханических процессов;
- развития релаксационных явлений в охлаждающих узлах;
- сокращения сроков службы отдельных узлов, активных и неактивных деталей электроприводов;
- снижения эффективности функционирования электропривода, смежного электротехнического оборудования и технологической линии;
- перегрева обмоток и питающих кабелей;
- ухудшения диэлектрических свойств и уско-

© Зиновкин В.В., Антонов Н.Л., Крисан Ю.А., 2017
DOI 10.15588/1607-6761-2017-2-1

ренного «старения» изоляционных материалов;

- обугливания изоляции системы возбуждения электромагнитного поля электродвигателя и электропривода в целом;

- увеличения общего фона акустических шумов и в спектре октавных частот;

- развития магнитострикционных явлений в магнитной системе и отдельных деталях конструкции;

- резонансных ферромагнитных и механических явлений;

- возрастания энергозатрат на единицу вырабатываемой продукции.

Очевидно, что для повышения эффективности электроприводов целесообразно выполнить комплексные исследования электромагнитных и электромеханических процессов с учетом реальных условий эксплуатации, режимов нагрузки двигателя и условий эксплуатации.

II. АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

В многочисленных литературных источниках отмечается, что даже в системах общего назначения в возбуждающих токах содержатся высшие гармоники. Значительное влияние оказывают гармоники до пятого порядка, а остальные не превышают 4,5% от первой [9]-[17]. Определяющее влияние на электромагнитные процессы в электротехническом оборудовании оказывают высшие гармоники, а также несимметрия возбуждающих токов и напряжений.

В системах электроснабжения энергоемких электротехнологических комплексов последние существенно превышают нормированные показатели качества электрической энергии и ужесточают условия работы электроприводов. В качестве примера на рис.1 и рис.2 приведены фрагменты регистограммы мощности и токов технологических коротких замыкания (т.к.з.) в системе электроснабжения энергоемкого электрометаллургического промышленного предприятия [18].

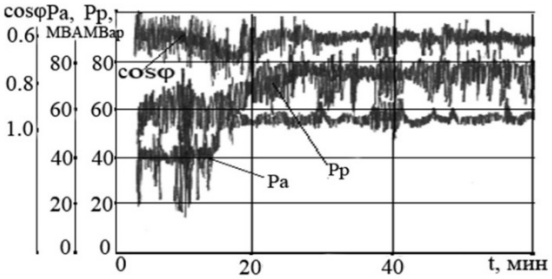


Рисунок 1. Регистограмма мощности в системе электроснабжения электрометаллургического предприятия при работе ДСП.

На рис.1 приняты следующие обозначения: (Pa) и (Pp) – активная и реактивная мощности, соответственно; (cosφ) - коэффициента мощности.

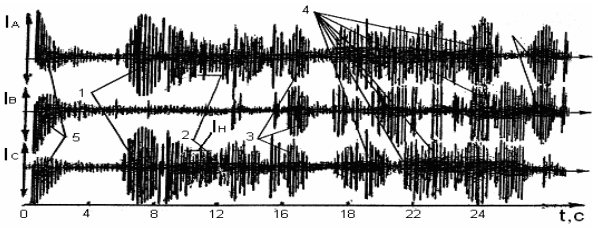


Рисунок 2. Фрагмент осциллограммы фоновых токов в режиме технологического короткого замыкания (т.к.з.) дуговой сталеплавильной печи.

На рис.2 приняты следующие обозначения: (1 и 2) – двухфазное т.к.з., (3) – трехфазное т.к.з., (4) – чередующиеся т.к.з., (5) - токи включения электропечного трансформатора, Iн – номинальный ток технологического режима.

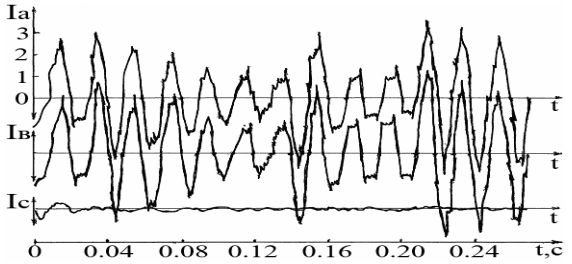
Из приведенных осциллограмм видно, что в отдельные моменты времени и в совокупности электрические параметры нагрузки изменяются и превышают нормируемых показателей качества электрической энергии. Такие режимы называют резкопеременными [3], [4], [10]. Наиболее неблагоприятными и, практически не контролируемыми, являются механические качания ротора электроприводов. Это приводит к усложнению соблюдения директивного управления технологическими процессами, отрицательно сказывается на соблюдении автоматизированного управления и технико-экономических показателях технологических объектов.

В литературных источниках приведены результаты исследований режимов синхронных машин [18]-[23]. Однако влияние резкопеременных нагрузок на электромагнитные и электромеханические процессы в синхронном электроприводе практически не исследованы.

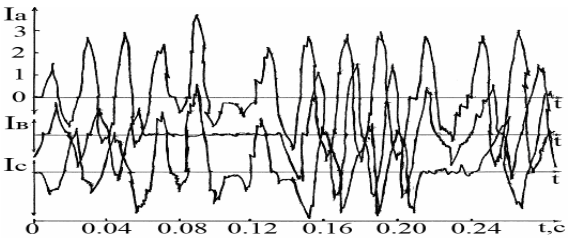
Известно, что внешние электрические параметры возбуждают в электрооборудовании соответствующие электромагнитные процессы. Последние, в свою очередь, определяют механические режимы электропривода, которые осуществляют регулировку исполнительных механизмов энергоемких технологических комплексов и отдельных установок с целью поддержания директивного задания. На рис.3 приведены осциллограммы мгновенных токов формы.

На рис.3 приняты следующие обозначения: *а*) – фрагмент двухфазного т.к.з.; *б*) - трехфазные т.к.з.

Очевидно, что при таком характере питания в электродвигателе протекают нестационарные электромагнитные явления, которые оказывают влияние на механические параметры на валу и, следовательно, на приводные механизмы технологической установки. Если при стационарном питании вращение вала будет равномерным ввиду постоянного действия по фазам возбуждающего электромагнитного поля и собственной инерционности, то при несимметрии возбуждающего тока электромеханические процессы имеют довольно сложный характер.



а)



б)

Рисунок 3. Осциллограммы мгновенных токов в процессе т.к.з. работе энергоемкого электротехнологического комплекса.

В момент больших кратностей тока возрастают электродинамические усилия, а при отсутствии тока механические усилия обеспечиваются за счет инерционности механической системы. При этом в отдельных фазах токи чередуются, а в отдельные моменты времени практически отсутствуют. Кроме этого несинусоидальность тока приводит к усложнению исследования и инженерных расчетов нестационарных электромагнитных и электромеханических процессов. Такой характер режимов приводит к ускоренному износу подшипников, релаксационным процессам, образованию уравнительных токов и потоков, возрастанию местных потерь и нагревов и др.

Исходя из первостепенных требований электропривода и обеспечения нормируемых колебаний вала двигателя и возрастающих требований к надежности, эффективности и снижения энергозатрат на единицу вырабатываемой продукции актуально исследовать:

- влияние нестационарных электромагнитных процессов на электромеханические параметры электропривода;

- разработать математическую модель нестационарных электромагнитных явлений и на ее основе, электромеханических процессов;

- сформировать технические требования и технические условия;

- предложить инженерные методы оценки колебаний вала синхронного электропривода при резкопеременных электрических нагрузках и реальных условиях эксплуатации.

III. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целю настоящей работы является исследование влияния резкопеременной электрической нагрузки на нестационарные электромагнитные явления и электромеханические процессы в синхронном приводе.

IV. ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

При стационарном нагружении и установившемся режиме синхронного электропривода взаимоиндуктивность L_{12} удобно представить в виде периодической функции. При резкопеременных нагрузках взамные индуктивности отдельных фаз будут отличаться и с течением времени представляют периодические функции сложной формы. Это позволяет решение поставленной задачи упростить с достаточной для инженерной практики точностью.

Построение идеализированной модели синхронного электропривода

Решение поставленной цели удобно исследовать на идеализированной модели синхронного электропривода без демпферных обмоток в следующем виде [13]:

$$L_{11}\frac{dI}{dt} + r_1 I + \frac{d(L_{12}i)}{dt} = u_1; \quad (1)$$

$$\frac{d(L_{12}I)}{dt} + r_2 i + L_{22}\frac{di}{dt} = u_2; \quad (2)$$

$$J_{in}\frac{d^2\theta^{gm}}{dt^2} - \frac{dL_{12}}{d\theta^{gm}}\cdot i\cdot I = M_{mh}, \quad (3)$$

где L_{11} и L_{22} – индуктивности обмоток статора и ротора;

I и i – мгновенные значения токов статора и ротора;

r_1 и r_2 – активные сопротивления статорной и роторной обмоток;

u_1 и u_2 – напряжения статора и ротора исследуемой машины;

L_{12} – взаимоиндуктивность обмоток статора и ротора;

J_{in} – момент инерции ротора;

θ^{gm} – угол поворота ротора относительно статора;

M_{mh} – момент механических сил на валу ротора.

Для повышения эффективности исследований необходимо учесть нелинейные взаимосвязи между электромагнитными и механическими параметрами электропривода. Это приводит к существенному усложнению математической модели. Поэтому на первом этапе решения поставленной задачи рассмотрим ее в линейном представлении, а параметры L_{11}, L_{22}, r_1, r_2 будем считать постоянными. При этом, в динамическом режиме, при питании резкопеременными токами и напряжениями, необходимо учитывать, что при вращении ротора, взаимоиндуктивность L_{12} будет изменяться во времени в виде периодической функции. Очевидно, при инженерных исследованиях одновременный учет таких процессов не представляется возможным. Поэтому на первом этапе исследуем однофазную модель с учетом влияния высших гармоник

и изменяющихся кратностях возбуждающего тока. При этом, взаимную индуктивность запишем в следующем виде:

$$L_{12} = \sum_{k=1}^{\infty} M_k \cdot cos \cdot k\rho\theta^{gm} , \qquad (4)$$

где M_k – амплитуда гармоники k-го порядка;

ρ – число пар полюсов электродвигателя.

Физическое представление электромеханических процессов

Исходя из физического представления электромеханических параметров, сомножитель $\rho\theta^{gm}$ выражаем посредством угловой скорости ротора двигателя (ω_{el}) и функции ($\upsilon(t)$), которая характеризует колебания ротора при механическом нагружении, относительно синхронного режима, в следующем виде:

$$\rho\theta^{gm} = \omega_{el} \cdot t + \upsilon(t) . \qquad (5)$$

В соответствие условиям постановки задачи $u_1 = U_{1m} \cdot sin(\omega_1 t + \alpha_1)$; u_2=$const$; U_{1m}, ω_1 – амплитуда и круговая частота подведенного к статору напряжения; α_1 – начальная фаза напряжения u_1. В силу режима синхронной машины (ω_{el}=ω_1) последний параметр одновременно характеризует угол опережения напряжения, подведенного к статору. Поэтому электромагнитный момент на валу ротора удобно представить в следующем виде:

$$M^{em} = \frac{dL_{12}}{d\theta^{gm}} \cdot i \cdot I . \qquad (6)$$

Очевидно, что даже при синусоидальном изменении во времени взаимоиндукции (L_{12}) в зависимости от угла (θ^{gm}) и токов ротора и статора (i, I, соответственно) вращающий момент (M^{em}) будет изменяться во времени по периодическому закону. При этом из уравнения (3) следует, что даже при постоянном моменте приложенных механических сил на валу ротора (M_{mh}) угловая скорость изменяется (не может быть постоянной). Из приведенного анализа электромагнитных и электромеханических процессов в синхронном электроприводе очевидно, что даже при приложенном синусоидальном напряжении, имеют место колебания ротора. При изменении возбуждающих параметров по периодическому несинусоидальному закону взаимосвязи между электромагнитными и электромеханическими параметрами существенно усложняются. Превышение нормируемых государственными стандартами показателей качества электрической энергии приводит к тому, что взаимная индуктивность (L_{12}) в зависимости от изменения угла (θ^{gm}) изменяется по более сложному периодическому несинусоидальному закону. Это приводит к увеличению механических колебаний ротора синхронного электропривода. Нелинейные зависимости между электромагнитными параметрами электропривода, а также несинусоидальные и резкопеременные возбуждающие токи и напряжения приводят к существенному усложнению рассматриваемой задачи. В этом случае математическая модель будет представлять собой сложную систему нелинейных дифференциальных уравнений. Точность решения этих уравнений существенно зависит от степени линеаризации отдельных параметров и зависимостей (индукции, потока, магнитострикции в магнитной системе, нагрева обмоток и деталей, высших гармоник в токах и напряжениях). Усложнение решения поставленной задачи приводит к существенному возрастанию вычислений, а также разработке отдельных математических и компьютерных моделей. Большое количество решаемых вариантов и точность приводят к усложнению использования на практике. Это поясняется отсутствием высококвалифицированных исследователей, вычислительных устройств и средств автоматизации, необходимости срочной разработки технических условий и технических требований в зависимости от условий и режимов работы электропривода, а также учета влияния смежных энергоемких электротехнологий (дуговые сталеплавильные печи, приводы прокатных станов, вставки и преобразователи, электролиз и др.)

На основании выше изложенного усматривается, что для решения практических задач целесообразно разрабатывать упрощенные модели, которые удовлетворяют техническим требованиям и обладают достаточной для инженерной практики точностью.

Взаимные связи между электромагнитными и механическими процессами

В первом приближении инженерное решение можно получить полагая, что второе слагаемое ($\upsilon(t)$) в (5), которое характеризует колебания ротора, относительно синхронного режима, постоянным $\upsilon^1(t)$=0. После преобразований и сохраняя физическую сущность взаимосвязей между электромагнитными и механическими процессами приходим к следующему равенству:

$$\rho\theta^{gm} = \omega_1 t . \qquad (7)$$

При этом условии периодическое решение исходных уравнений (1) – (2) получаем, решая соответствующие системы линейных неоднородных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами. При этом искомые периодические функции i и I следует представить в следующем виде:

$$I = I_0 \sum_{n=1}^{\infty} (I_n' \cdot sin \cdot n \cdot \omega_1 t + I_n'' \cdot cos \cdot n \cdot \omega_1 t) ; \qquad (8)$$

$$i = i_0 \sum_{n=1}^{\infty} (i_n' \cdot sin \cdot n \cdot \omega_1 t + i_n'' \cdot cos \cdot n \cdot \omega_1 t) . \qquad (9)$$

Дальнейшее исследование состоит в анализе физической сущности произведений ($i \cdot L_{12}$) и ($I \cdot L_{12}$). В математическом представлении первый сомножитель представляем в следующем виде:

$$iL_{12}=\sum_{k=1}^{\infty} i_0 M_k \cdot \cos k\omega_1 t+\sum_{n=1}^{\infty}\sum_{k=1}^{\infty} M_k \cdot \cos k\omega_1 t \cdot (i_0'' \cdot \cos n\omega_1 t)=$$

$$=\sum_{k=1}^{\infty} i_0 M_k \cdot \cos k\omega_1 t+\frac{1}{2} n_1 \sum_{k=1}^{\infty} M_k i_0' [\sin(n+k)\cdot\omega_1 t+\sin(n-k)\cdot$$

$$\cdot\omega_1 t]+\frac{1}{2} n_1 \sum_{k=1}^{\infty} M_k i_n'' [\cos(n+k)\cdot\omega_1 t+\cos(n-k)\cdot\omega_1 t].$$

После преобразований и упрощений приходим к следующему равенству:

$$iL_{12}=i_0 L_{12}+\sum_{j=1}^{\infty}(K_j' \cdot \sin j\omega_1 t+K_j'' \cdot \cos j\omega_1 t)+\sum_{n=1}^{\infty} M_n i_n'', \quad (10)$$

где

$$K_j'=\frac{1}{2}\sum_{n=1}^{\infty}(M_{j-n}+M_{n-j}-M_{n+j})\cdot i_n';$$

$$K_j''=\frac{1}{2}\sum_{n=1}^{\infty}(M_{j-n}+M_{n-j}-M_{n+j})\cdot i_n''. \quad (11)$$

Следует отметить, что здесь коэффициенты M с отрицательными и нулевыми индексами представляют бесконечно малые значения. Это необходимо для получения инженерного решения с сохранением взаимных связей между электромагнитными и механическими процессами в синхронном электроприводе.

Аналогично получаем выражение для IL_{12}

$$IL_{12}=i_0 L_{12}+\sum_{j=1}^{\infty}(P_j' \cdot \sin j\omega_1 t+P_j'' \cdot \cos j\omega_1 t)+\sum_{n=1}^{\infty} M_n I_n'', \quad (12)$$

где $P_j'=\frac{1}{2}\sum_{n=1}^{\infty}(M_{j-n}+M_{n-j}-M_{n+j})\cdot I_n'$; (13)

$$P_j''=\frac{1}{2}\sum_{n=1}^{\infty}(M_{j-n}+M_{n-j}-M_{n+j})\cdot I_n''.$$

Математическую модель электромагнитных и электромеханических процессов получаем путем подстановки полученных выражений в дифференциальные уравнения (1) – (2). При этом необходимым условием является строгое соблюдение режима синхронной машины ($\omega_{el}=\omega_1$), а взаимоиндуктивности преобразуем к следующему виду:

$$L_{11}=\sum_{j=1}^{\infty} j\omega_1(I_j' \cdot \cos j\omega_1 t+I_j'' \cdot \sin j\omega_1 t)+$$

$$+r_1\sum_{j=1}^{\infty}(I_j' \cdot \sin j\omega_1 t+I_j'' \cdot \cos j\omega_1 t)+$$

$$+\sum_{j=1}^{\infty}[-i_0 M_j \cdot j\omega_1 t+j\omega_1(K_j' \cdot \cos j\omega_1 t-K_j'' \cdot \sin j\omega_1 t]=$$

$$=u_1' \cdot \sin\omega_1 t+u_1'' \cdot \cos\omega_1 t+\sum_{j=1}^{\infty} j\omega_1(P_j' \cdot \cos j\omega_1 t-P_j'' \cdot \sin j\omega_1 t$$

$$+r_2\sum_{j=1}^{\infty}(i_1' \cdot \sin\omega_1 t+i_1'' \cdot \sin j\omega_1 t)+ \quad (14)$$

$$+L_{22}\sum_{j=1}^{\infty} j\omega_1(i_j' \cdot \cos j\omega_1 t+i_j'' \cdot \sin j\omega_1 t)=u_2,$$

где приняты следующие обозначения:

$$u_1'=U_{1m}\cdot\cos\alpha_1;\ u_1''=U_{1m}\cdot\sin\alpha_1.$$

Дальнейшее преобразование заключается в том, что коэффициенты при тригонометрических функциях с одинаковыми индексами j приравниваем и после преобразований, приходим к системе уравнений для определения токов статора и ротора при следующих начальных условиях.

При j=0 $r_1 I_0=0$; $r_2 i_0=U_2$,

$$I_0=0;\ i_0=\frac{U_2}{r_2}. \quad (15)$$

При j=1 $\omega_1 L_{11} I_1'+r_1 I_1''+\omega_1 K_1'=u_1''$;

$$r_1 I_1'-\omega_1 L_{11} I_1''-\omega_1 K_1''=u_1''+\omega_1 M_1 i_0; \quad (16)$$

$$\omega_1 L_{22} i_1'+r_2 i_1''+\omega_1 P_1'=0;$$

$$r_2 i_1'-\omega_1 L_{22} i_1''-\omega_1 P_1''=0.$$

При $j\geq 2$ $j\omega_1 L_{11} I_j'-r_1 I_j''=j\omega_1 K_1'=0$;

$$r_1 I_1'-j\omega_1 L_{11} I_1''-j\omega_1 K_1''=j\omega_1 M_j i_0; \quad (17)$$

$$j\omega_1 L_{22} i_j'+r_2 i_j''=j\omega_1 P_j'=0;$$

$$r_2 i_j'-j\omega_1 L_{22} i_1''-j\omega_1 P_1''=0.$$

Влияние высших гармоник на электромагнитные и электромеханические процессы

Выполним анализ влияния высших гармоник на эдектромагнитные процессы в синхронном электроприводе. Решение уравнений отыскиваем с учетом гармоник до четвертого порядка. При указанных условиях, согласно формуле (4), только коэффициенты M_1 и M_3 не равными нулю, а в выражениях (11) и (13), в силу физической сущности процессов, они отображают только постоянные K_1', K_1'', K_2', K_2'', K_3', K_3'', P_1', P_1'', P_2', P_2'', P_3', P_3''.

Эти постоянные, для приведенных выше начальных условий и соответствующих гармоник, принимают следующий вид:

$$K_1' = \frac{1}{2}(M_1 - M_3)i_2';$$

$$K_1'' = \frac{1}{2}(M_1 + M_3)i_2'';$$

$$K_2' = \frac{1}{2}[(M_1 - M_3)i_2' + M_1 i_3'];$$

$$K_2'' = \frac{1}{2}[(M_1 + M_3)i_2'' + M_1 i_3''];$$

$$K_3' = \frac{1}{2}M_1 i_2'; \; K_3'' = \frac{1}{2}M_1 i_2''. \qquad (18)$$

Постоянные P_1', P_1'', P_2', P_2'', P_3', P_3'' получаем путем замены i_n', i_n'' на I_n', I_n''.

Очевидно, что в левых частях уравнений системы (16) – (17), (в которых не равные нулю правые части) входят только I_j', I_j'' (с нечетными индексами), и i_2', i_2''. В уравнениях с нечетными индексами I_2', I_2'' и i_j', i_j'', правые части равными нулю. Отсюда следует, что при принятых идеализированных условиях и сохранении физического смысла электромагнитных процессов в синхронном электроприводе

$$i_1' = i_1'' = I_2' = I_2'' = i_3' = i_3'' = 0,$$

и $$K_2' = K_2'' = P_1' = P_1'' = P_3' = P_3'' = 0.$$

Таким образом, для определения шести неизвестных I_1', I_2'', i_2', i_2'', I_3', I_3'' в уравнениях (16) – (17) и их взаимных связей необходимо выполнить анализ с соблюдением физической сущности электромагнитных процессов в электроприводе. С этой целью, на основании выше приведенных исследований, воспользуемся следующей математической моделью:

$$\omega_1 L_{11} I_1' + r_1 I_1'' + \frac{\omega_1}{2} - (M_1 - M_3)\cdot i_2' = u_1'';$$

$$r_1 I_1' - \omega_1 L_{11} I_1'' - \frac{\omega_1}{2}(M_1 - M_3)\cdot i_2'' = u_1' + \omega_1 M_1 i_0;$$

$$r_2 i_2' - 2\omega_1 L_{22} i_2'' - \frac{2\omega_1}{2}[(M_1 - M_3)\cdot I_1'' + M_1 I_3''] = 0;$$

$$3\omega_1 L_{11} I_3' + r_1 I_3'' + \frac{3\omega_1}{2} M_1 i_2' = 0; \qquad (19)$$

$$r_1 I_2' - 3\omega_1 L_{11} I_3'' - \frac{3\omega_1}{2} M_1 i_2'' = 3\omega_1 M_3 i_0.$$

На первом этапе отыскиваем I_3', I_3'' путем представления их через i_2', i_2'' при помощи двух последних уравнений. В результате преобразований приходим к следующей системе уравнений:

$$\left.\begin{aligned} I_3 &= a_2 i_2' - b_2 i_2'' + c_2' i_0; \\ I_3'' &= b_2 i_2' - a_2 i_2'' + c_2' i_0, \end{aligned}\right\} \qquad (20)$$

где приняты обозначения

$$a_2 = \frac{3\omega_1 M_1}{2}\cdot\frac{3\omega_1 L_{11}}{z_{1(3)}^2}; \; b_2 = \frac{3\omega_1 M_1}{2}\cdot\frac{r_1}{z_{1(3)}^2};$$

$$c_2' = 3\omega_1 M_3 \cdot \frac{3\omega_1 L_{11}}{z_{1(3)}^2}; \; c_2'' = 3\omega_1 M_3 \cdot \frac{r_1}{z_{1(3)}^2};$$

$$z_{1(3)}^2 = r_1^2 + 9\omega_1^2 L_{11}^2. \qquad (21)$$

Для установления аналитической связи между электромагнитными и электромеханическими процессами, подставляя значения токов I_3', I_3'' в два предыдущих уравнения рассматриваемой системы, приходим к следующим равенствам:

$$2\omega_1\left(L_{22} + \frac{M_1}{2}a_2\right)i_2' + \left(r_2 + \frac{2\omega_1 M_1}{2}b_2\right)i_2'' =$$
$$= -\frac{2\omega_1(M_1 - M_3)}{2}I_2' - \frac{2\omega_1 M_1}{2}c_2' i_0;$$

$$\left(r_2 + \frac{2\omega_1 M_1}{2}b_2\right)i_2' - 2\omega_1\left(L_{22} + \frac{M_1}{2}a_2\right)i_2'' = -\frac{2\omega_1 M_1}{2}c_2' i_0.$$

Принимая, что

$$L_{22}\frac{M_1}{2}a_2 = L_{22(2)} \text{ и } r_2 - \frac{2\omega_1 M_1}{2}b_2 = r_{2(2)}, \qquad (22)$$

получим

$$\left.\begin{aligned} i_2' &= a_1' I_1' - b_1' I_1' + c_1' i_0 \\ i_2'' &= a_1'' I_1' - b_1'' I_1' + c_1'' i_0, \end{aligned}\right\} \qquad (23)$$

где

$$a_1' = -\frac{2\omega_1(M_1 - M_3)}{2}\cdot\frac{2\omega_1 L_{22(2)}}{Z_{2(2)}^2};$$

$$b_1' = -\frac{2\omega_1(M_1 + M_3)}{2}\cdot\frac{r_{2(2)}}{Z_{2(2)}^2};$$

$$a_1'' = -\frac{2\omega_1(M_1 - M_3)}{2}\cdot\frac{r_{2(2)}}{Z_{2(2)}^2};$$

$$b_1'' = -\frac{2\omega_1(M_1 + M_3)}{2}\cdot\frac{2\omega_1 L_{22(2)}}{Z_{2(2)}^2}; \qquad (24)$$

$$c_1' = -\frac{2\omega_1 M_1}{2}\cdot\left(\frac{2\omega_1 L_{22(2)}}{Z_{2(2)}^2}c_1'' + \frac{r_{2(2)}}{Z_{2(2)}^2}c_2'\right);$$

$$c_1'' = -\frac{2\omega_1 M_1}{2}\cdot\left(\frac{r_{2(2)}}{Z_{2(2)}^2}c_1'' - \frac{2\omega_1 L_{22(2)}}{Z_{2(2)}^2}c_1'\right);$$

$$Z_{2(2)}^2 = r_{2(2)}^2 + 4\omega_1^2 L_{22(2)}^2 .$$

Подставим (23) в первые два уравнения и выполнив соответствующие преобразования с сохранением физической сущности электромагнитных процессов, получаем следующее решение:

$$\omega_1\left(L_{11} - \frac{M_1 - M_3}{2}a_1'\right)I_1' + \left(r_1 - \frac{\omega_1(M_1 - M_3)}{2}b_1'\right)I_1'' =$$

$$= -\frac{\omega_1(M_1 - M_3)}{2}c_1' i_0 + u_1'';$$

$$\left(r_1 - \omega_1\frac{M_1 + M_3}{2}a_1''\right)I_1' - \omega_1\left(L_{11} + \frac{M_1 - M_3}{2}b_1''\right)I_1'' =$$

$$= \left[\frac{\omega_1(M_1 + M_3)}{2}c_1'' + \omega_1 M_1\right]i_0 + u_1'.$$

С целью приведения полученных результатов исследований математических моделей к инженерному решению принимаем, что

$$L_{11} + \frac{M_1 - M_3}{2}a_1' = L_{11(1)}';\ L_{11} + \frac{M_1 + M_3}{2}b_1'' = L_{11(1)}'';$$

$$r_1 - \omega_1\frac{M_1 - M_3}{2}b_1' = r_{1(1)}'';\ r_1 - \omega_1\frac{M_1 + M_3}{2}a_1'' = r_{1(1)}'. \quad (25)$$

Полученные результаты в полной мере отображают взаимные связи между электромагнитными параметрами синхронного электропривода. Здесь

$$\left.\begin{aligned} I_1' &= \frac{r_{1(1)}''}{Z_{1(1)}^2}u_1' + \frac{\omega_1 L_{11(1)}''}{Z_{1(1)}^2}u_1'' + m_1' i_0;\\ I_1'' &= \frac{\omega L_{11(1)}'}{Z_{1(1)}^2}u_1' + \frac{r_{1(1)}}{Z_{1(1)}^2}u_1'' + m_1'' i_0, \end{aligned}\right\} \quad (26)$$

где

$$m_1' = \frac{-\omega_1 L_{11}'' c_{1(1)}' + r_{1(1)}''\cdot c_{1(1)}''}{\omega_1^2 L_{11(1)}'\cdot L_{11(1)}'' + r_{1(1)}'\cdot r_{1(1)}''};$$

$$m_1'' = \frac{r_{1(1)}'\cdot c_{1(1)}' + \omega_1 L_{11}' c_{1(1)}''}{\omega_1^2 L_{11(1)}'\cdot L_{11(1)}'' + r_{1(1)}'\cdot r_{1(1)}''};$$

$$Z_{1(1)}^2 = r_{1(1)}'\cdot r_{1(1)}'' + \omega_1^2 L_{11(1)}'\cdot\omega_1^2 L_{11(1)}''. \quad (27)$$

Влияние первой гармоники статорного тока

Влияние первой гармоники статорного тока через напряжения, подведенные к статору и ротору, можно оценить по формулам (20) и (23). При этом вторую гармонику роторного и третью гармонику статорного тока можно определить путем задания соответствующих напряжений согласно следующей системе:

$$\left.\begin{aligned} i_2' &= B_1' u_1' + B_1'' u_1'' + A_1 i_0;\\ i_2'' &= B_2' u_1' + B_2'' u_1'' + A_2 i_0. \end{aligned}\right\} \quad (28)$$

При этом целесообразно воспользоваться следующими обозначениями:

$$B_1' = a_1'\frac{r_{1(1)}''}{Z_{1(1)}^2} + b_1'\frac{\omega_1 L_{11(1)}'}{Z_{1(1)}^2};\ B_1'' = a_1'\frac{\omega_1 L_{11(1)}''}{Z_{1(1)}^2} - b_1'\frac{r_{1(1)}'}{Z_{1(1)}^2};$$

$$B_2' = a_1''\frac{r_{1(1)}''}{Z_{1(1)}^2} - b_1''\frac{\omega_1 L_{11(1)}'}{Z_{1(1)}^2};\ B_2'' = a_1''\frac{\omega_1 L_{11(1)}''}{Z_{1(1)}^2} + b_1''\frac{r_{1(1)}'}{Z_{1(1)}^2};$$

$$A_1 = a_1' m_1' + b_1' m_1' + c_1';\ A_2 = a_1'' m_1' + b_1'' m_1'' + c_1'', \quad (29)$$

и

$$I_3' = (a_2 B_1' - b_2 B_2')u_1' + (a_2 B_1'' - b_2 B_2'')u_1'' + (a_2 A_1 - b_2 A_2 + c_2'')i_0; \quad (30)$$

$$I_3'' = (b_2 B_1' - a_2 B_2')u_1' + (b_2 B_1'' + a_2 B_2'')u_1'' + (b_2 A_1 + a_2 A_2 - c_2')i_0.$$

Следует отметить, что полученные результаты инженерных расчетов и анализа электромагнитных и электромеханических параметров синхронного электропривода определяются с точностью, удовлетворяющей инженерной практики. Для научных исследований необходимо воспользоваться математическими и компьютерными моделями. В первом приближении токи в статоре и роторе, целесообразно определить, воспользовавшись формулами (8)-(9), а электромагнитный момент по следующему уравнению:

$$M^{Iem} = -\frac{\rho}{2}\left\{M_1\left[i_0 I_1' - \frac{i_2''}{2}(I_1' - I_3') + \frac{i_2'}{2}(I_1'' - I_3'')\right] + \right.$$

$$\left. + 3M_3\left[i_0 I_3' + \frac{i_2'' I_1' + i_2' I_1''}{2}\right]\right\} - \frac{\rho}{2}\left\{\left\{M_1\left[i_0\left(I_1'' - I_3''\right) + \frac{i_2'}{2}\left(I_1' - I_3'\right) + \right.\right.\right.$$

$$\left.\left. + \frac{i_2' I_1' + i_2'' I_3''}{2}\right] + 3M_3\left[\frac{i_2}{2}\left(I_1' + I_3'\right) + \frac{I_1''}{2}\left(i_0 + i_2''\right) + \frac{i_0 I_1'' + i_2' I_3'}{2}\right]\right\}\times$$

$$\times sin2\omega_1 t + \frac{\rho}{2}\left\{M_1\left[i_0\left(I_1' - I_3'\right) - \frac{I_2''}{2}\left(I_1' - I_3'\right) - \frac{i_2'' I_1'' + i_2' I_3'}{2}\right] - \right.$$

$$\left. - 3M_3\left[\frac{I_1'}{2}\left(i_0 - i_2''\right) - \frac{i_2''}{2}\left(I_1' + I_3'\right) + \frac{i_0 I_1' + i_2'' I_3'}{2}\right]\right\}\cdot cos2\omega_1 t. \quad (31)$$

Причём, для получения более точного решения для составляющих токов, целесообразно воспользоваться совокупностью выражений (26) – (30).

Влияние нестационарных электромагнитных процессов на колебательные процессы вала

Приведем анализ механического колебательного параметра $\upsilon(t)$ во втором приближении. При этом будем учитывать, что этот параметр в значительной степени зависит от нестационарных электромагнитных процессов и от геометрических размеров электропривода согласно следующим равенствам:

$$\theta^{gm} = \omega_{gm} \cdot t + \frac{\upsilon^{11}(t)}{p}; \quad (32)$$

$$\frac{d^2\theta^{gm}}{dt^2} = \frac{1}{p} \cdot \frac{d^2\upsilon^{11}(t)}{dt^2}. \quad (33)$$

Подставляя значение $\frac{d^2\theta^{gm}}{dt^2}$ из (33), токи i, I первого приближения и M^{Iem} из формулы (31) в уравнение моментов (3), получаем

$$\frac{I}{p}\cdot\frac{d^2\upsilon^{11}(t)}{dt^2} = M^{Iem} - \frac{\rho}{2}\left\{M_1\left[i_0 I_1' - \frac{i_2''}{2}(I_1''-I_3'') + \frac{i_2'}{2}(I_1''-I_3'')\right] + \right.$$
$$\left. + 3M_3\left[i_0 I_3' + \frac{i_2'' I_1' + i_2' I_1''}{2}\right]\right\} - \frac{\rho}{2}\left\{M_1\left[i_0\left(I_1''-I_3''\right) + \frac{i_2'}{2}\left(I_1'-I_3'\right) + \right.\right.$$
$$\left.\left. + \frac{i_2' I_1' + i_2' I_3'}{2}\right] + 3M_3\left[\frac{i_2}{2}\left(I_1'+I_3'\right) + \frac{I_1''}{2}\left(i_0+i_2''\right) + \frac{i_0 I_1'' + i_2' I_3'}{2}\right]\right\}\times$$
$$\times sin2\omega_1 t + \frac{\rho}{2}\left\{M_1\left[i_0\left(I_1'-I_3'\right) - \frac{I_2''}{2}\left(I_1'-I_3'\right) - \frac{i_2'' I_1' + i_2' I_3''}{2}\right] - \right.$$
$$\left. - 3M_3\left[\frac{I_1'}{2}\left(i_0 - i_2''\right) - \frac{i_2''}{2}\left(I_1'+I_3'\right) + \frac{i_0 I_1' + i_2'' I_3'}{2}\right]\right\}\cdot cos2\omega_1 t. \quad (34)$$

Приравнивая постоянную часть электромагнитного момента моменту механических сил на валу ротора M_{meh} (который его уравновешивает), определяем начальную фазу подведенного напряжения α_1. (Следует отметить, что при дальнейших исследованиях его второе приближение целесообразно обозначить α_1^{11}).

$$M_{meh} = \frac{\rho}{2}\left\{M_1\left[i_0 I_1' - \frac{i_2''}{2}\left(I_1'-I_3'\right) + \frac{i_2'}{2}\left(I_1'-I_3''\right)\right] + \right.$$
$$\left. + 3M_3\left[i_0 I_3' + \frac{i_2'' I_1' + i_2' I_1''}{2}\right]\right\}. \quad (35)$$

Здесь, в первом приближении составляющие токов статора и ротора, удобно выражать через u_1', u_1'' в которых автоматически учитывается параметр α_1 (см. формулу (14) и др.).

Переменная часть электромагнитного момента определяет значение колебательной функции $\upsilon(t)$ во втором приближении с точностью до третьей гармоники включительно, т. е. $\upsilon^{11}(t)$:

$$\upsilon^{11}(t) = \frac{\rho^2}{8\omega_1^2 I_{in}}\left\{M_1\left[i_0\left(I_1''-I_3''\right) + \frac{i_2'}{2}\left(I_1'-I_3'\right) + \frac{i_2' I_1' + i_2'' I_3''}{2}\right] + \right.$$
$$\left. + 3M_3\left[\frac{i_2'}{2}\left(I_1'-I_3'\right) + \frac{I_1''}{2}\left(i_0+i_2''\right) + \frac{i_0 I_1'' + i_2' I_3'}{2}\right]\right\} sin2\omega_1 t -$$
$$- \frac{\rho^2}{8\omega_1^2 I_{in}}\left\{M_1\left[i_0\left(I_1'-I_3'\right) - \frac{i_1''}{2}\left(I_1'-I_3'\right) - \frac{i_2'' I_1' + i_2' I_3''}{2}\right] - \right.$$
$$\left. - 3M_3\left[\frac{I_1'}{2}\left(i_0 - i_2''\right) - \frac{i_2''}{2}\left(I_1'-I_3'\right) + \frac{i_0 I_1' + i_2'' I_3'}{2}\right]\right\} cos2\omega_1 t. \quad (36)$$

В частном случае, когда пространственное распределение магнитной индукции в воздушном зазоре (M_3=0) представляется в виде периодической синусоидальной функции, колебательная функция во втором приближении преобразуется к следующему виду:

$$\upsilon^{11}(t) = \frac{M_1\rho^2}{8\omega_1^2 J_{in}}\left\{\left[i_0\left(I_1''-I_3''\right) + i_2'\left(I_1' - \frac{I_3'}{2}\right) + \frac{i_2'' I_3''}{2}\right]\sin 2\omega_1 t - \right.$$
$$\left. - \left[{}_0\left(I_1'-I_3'\right) - i_2''\left(I_1' - \frac{I_3'}{2}\right) - \frac{i_2' I_3''}{2}\right] cos2\omega_1 t\right\}. \quad (37)$$

Инженерная методика оценки колебаний вала

В качестве примера возьмем синхронный двигатель со следующими параметрами: мощность P_{2N}=4,5кВт; напряжение U_N=380 В; частота f=50 Гц; частота вращения n_N=1500 об/мин.

Определим величину колебательной функции $\upsilon^{11}(t)$ для случаев синусоидального (1) и несинусоидального (2) распределения магнитной индукции в воздушном зазоре.

Классическое распределение магнитного поля в пространстве электродвигателя

В случае синусоидального распределения магнитной индукции в воздушном зазоре значение колебательной функции $\upsilon^{11}(t)$ определиться из формулы (37), причем $M_1 = \frac{8}{\pi^2}\frac{\omega_1\omega_2 p}{R_M}\cdot k_{\omega_1}\cdot k_{\omega_2}$, остальные параметры для расчета колебательной функции приведены в табл.1.

Порядок вычисления колебательной функции υ11(t) следующий. Определяем коэффициенты a_2, b_2, c_2', c_2'', a_1', b_1', a_1'', b_1'', a', c_1'', m_1', m_1'', B_1', B_1'', B_2', B_2'', A_2, A_1 по формулам (21), (24), (27), (29). Вычис-

ляем токи $I_1^{'}, I_1^{''}$, $i_2^{'}$, $i_2^{''}, I_3^{'}, I_3^{''}$ по формулам (26), (28), (30). Находим значение колебательной функции $\upsilon^{11}(t)$ по формуле (37).

Сделав соответствующие вычисления, получим числовое значение колебательной функции $\upsilon^{11}(t)$:

$$\upsilon^{11}(t) = -3{,}1 \cdot 10^{-4} \cdot sin(2\omega_1 t - \gamma_1);$$

$$tg\gamma_1 = 0{,}3.$$

Таблица 1. Параметры колебательной функции

Обозначение	Параметр	Величина
w_1	число витков на пару полюсов в статоре	196
w_2	число витков на пару полюсов в роторе	244
p	число пар полюсов	2
R_M	сопротивление магнитопровода на пару полюсов, *В·сек*	$F_0/Ф$
$Ф$	магнитный поток основной частоты, *Вб*	$2{,}7 \cdot 10^{-3}$
F_0	суммарная м.д.с холостого хода на пару полюсов, *А*	219
kw_1	обмоточный коэффициент статора	0,934
kw_2	обмоточный коэффициент ротора	1
ω_2	угловая скорость вращения ротора, c^{-1}	314
r_2	активное сопротивление обмотки ротора, *Ом*	0,54
$\omega_2 L_{11}$	индуктивное сопротивление обмотки ротора, *Ом*	18,84
r_1	активное сопротивление обмотки статора , *Ом*	0,91
$\omega_1 L_{22}$	индуктивное сопротивление обмотки статора, *Ом*	44
J_{in}	момент инерции ротора, *кгм*^{2}	2,7
$I_{ст.н}$	ток нагрузки статора, *А*	22,8
i_{BN}	ток возбуждения (номинальный) ротора, *А*	$i_0 = i_{BN}$ =18
$i_{в.х.х.}$	ток возбуждения холостого хода ротора, *А*	9

Несинусоидальное распределение магнитного поля в пространстве электродвигателя

В случае несинусоидального распределения магнитной индукции в воздушном зазоре значение колебательной функции определяется из формулы (36), причем $M_3 = 1/4 \cdot M_1$:

$$\upsilon^{11}(t) = -8 \cdot 10^{-4} \cdot sin(2\omega_1 t - \gamma_2);\ tg\gamma_2 = 0{,}1.$$

Аналогично находятся колебания ротора для явнополюсной синхронной машины, т. е. когда коэффициент самоиндукции статора является не постоянной величиной, а функцией времени. В этом случае последовательность электромагнитных процессов сохраняется, но все математические выкладки и соответствующие результаты будут более громоздкими, что может быть объектом дальнейших исследований

V. ВЫВОДЫ

Предложенная методика исследований нестационарных электромагнитных и электромеханических процессов, которые возбуждаются резкопеременными токами, в обобщенном синхронном электроприводе позволяет:

- оценить влияние высших гармоник в возбуждающем токе на электромагнитные процессы и электромеханические параметры, не прибегая к рассмотрению решения бегущего электромагнитного поля в пространстве двигателя;

- решить инженерные задачи и осуществлять контроль колебаний вала электрической машины относительно нормированных показателей государственными стандартами и нормативно-технической документацией.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1]. Постников И.М. Проектирование электрических машин. / И.М. Постников; Гостехиздат УССР. – К., 1960. – 234с.

[2]. Уайт Д. Электромеханическое преобразование энергии. / Д. Уайт, Г. Вудсон; – М.-Л.: Энергия, 1964. – 240с.

[3]. Зиновкин В.В. Нестационарные электромагнитные процессы в электрооборудовании энергоемких электротехнологических комплексов с резкопеременным характером нагрузки / В.В. Зиновкин // Радіоелектроніка, Інформатика, Управління. – 2005. – №2. – С. 142 – 148.

[4]. Зиновкин В.В. Вероятностные параметры резкопеременных нагрузок энергоемких электротехнологических комплексов / В.В. Зиновкин // ІЕД НАН України. – 2005. – №1(10). – С. 136 – 144.

[5]. Зиновкин В.В. Исследование электротермических процессов в контактах переключающих устройств при резкопеременной нагрузке / В.В. Зиновкин, О.Г. Волкова, В.В. Карпенко // Електротехніка та електроенергетика. – 2006. – №2. – С.52 – 57.

[6]. Computer optimization on energy- and save resource expert system parameters of management electrosteel-smelting / I. Trufanov; V. Metelskiy; L. Bogdanova; Y. Krisan // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (IEEE Cat. No.02EX542). Year: 2002. - p.207.

[7]. Заболотный А.П. Усовершенствованный метод потенциальной функции для формирования оптимальной структуры распределительных сетей /

А.П. Заболотный, Д.В. Федоша, А.А. Яценко, Н.Л. Криворученко // Электротехника и электроэнергетика. – 2008. - № 1. – С. 74 – 80.

[8]. Безотосный В.Ф. Учет энергетических факторов при расчете намагниченности ферромагнитных материалов / В.Ф. Безотосный, Э. В. Власенко // Электротехника и электроэнергетика. – 2004. - №. 1 – С. 13–17.

[9]. Зиновкин В.В. Имитационное моделирование нестационарных электромагнитных процессов и их характерных особенностей с использованием TOOL BOX POWER SUSTEM пакета MATLAB / В.В Зиновкин, М.Ю. Залужный // Труды Междун. научн. – техн. конф.: «Проблемы повышения эффективности электромеханических преобразователей в электроэнергетических системах». – Севастополь. СНТУ. – 2003. С. 75 – 80.

[10]. Залужный М.Ю. Моделирование нестационарных электромагнитных процессов в системе электроснабжения энергоемких электротехнологических комплексов / М.Ю. Залужный // Електротехніка та електроенергетика. – 2009. – №2. – С.70 – 73.

[11]. Антонов Н.Л. Прогнозирующее релейно-векторное регулирование статорного тока в асинхронном электроприводе с упрощенным двухзвенным непосредственным преобразователем частоты/ Н.Л. Антонов // Електротехніка та електроенергетика. – 2008. – №1. – С.37 – 48.

[12]. Коцур М.И. Особенности ударного теплового воздействия на асинхронный двигатель с модифицированной системой импульсного регулирования в условиях частых пусков [Текст] / М.И. Коцур // Электротехника и электроэнергетика – 2014. – №1. – С. 32–36. DOI: 10.15588/1607-6761-2014-1-5.

[13]. Ярымбаш С.Т. Особенности определения параметров эклектической схемы замещения печной петли печи графитации переменного тока. / С.Т. Ярымбаш, И.М. Килимник, Д.С. Ярымбаш // Електротехніка та електроенергетика. – 2010. – №2. – С.36 – 43.

[14]. Лазарев В.И. О причине уменьшения сил осевой прессовки обмоток трансформаторов при коротких замыканиях / В.И. Лазарев, ИВ Лазарев // Електротехніка та електроенергетика, 2005 - №1 – С.18-22

[15]. Зиновкин В.В. Моделирование автоматизированного электропривода дозатора технологической линии приготовления газобетона / В.В. Зиновкин, Э.М. Кулинич // Електротехніка та електроенергетика. – 2009. – №2. – С.49 – 53.

[16]. Милых В. И. Анализ гармонического состава переменного магнитного поля, связанного с вращающимся ротором турбогенератора, в режиме холостого хода и короткого замыкания [Текст] / В. И. Милых, Н. В. Полякова // Электротехника и электроэнергетика. – 2013. – №2. – С. 5 – 12. DOI: 10.15588/1607-6761-2013-2-1.

[17]. Ярымбаш Д. С. Особенности трехмерного моделирования электромагнитных полей асинхронного двигателя [Текст] / Д. С. Ярымбаш, М. И. Коцур, С. Т. Ярымбаш, И. М. Коцур // Электротехника и электроэнергетика – 2016. – № 2. – С. 43–50. DOI: 10.15588/1607-6761-2016-2-5.

[18]. Постников И.М. Результаты и задачи исследования электромагнитных и тепловых явлений в концевых частях мощных турбогенераторов / И.М. Постников, Г.Г. Счастливый // Вестник АН УССР. Наукова думка. – 1972. – №8. – С.59-71.

[19]. Sugimoto H., Tamai S. Secondary resistance identification of an induction motor applied model reference adaptive system and its characteristics / H.Sugimoto, S. Tamai // IEEE Trans. Ind. Appl., 1987. – P.296 - 303. DOI: 10.1109/TIA.1987.4504905

[20]. Islam M. S. Experimental Verification of Design Techniques of Permanent-Magnet Synchronous Motors for Low-Torque-Ripple Applications // IEEE Transactions on Industry Applications, Year: 2011, Volume: 47, Issue: 1; P. 88 - 95. DOI: 10.1109/ECCE.2009.5316068

[21]. Islam M. S. Design considerations of sinusoidally excited permanent-magnet Machines for low-torque-ripple applications / M.S. Islam; S. Mir; T. Sebastian; S. Underwood // IEEE Transactions on Industry Applications; Year: 2005, Volume: 41, Issue: 4 P.955 - 962. DOI: 10.1109/TIA.2005.851026

[22]. Steven R.E. An experimental effective value of the guadratureaaxis synchronous reactance of sunchronous machine. The Institution of electrcal endiners. paper №3750 s. dec., 1961. – p. 54-58. DOI: 10.1049/pi-a.1961.0108

[23]. Павлюк К. Пуск и асинхронные режимы синхронных двигателей. / К. Павлюк, С. Беднарек. – М.: Энергия, 1971. – 270 с

Стаття надійшла до редакції 31.07.2017

ВПЛИВ НЕСТАЦІОНАРНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ НА ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ ПАРАМЕТРИ У СИНХРОННОМУ ЕЛЕКТРОПРИВОДІ

ЗІНОВКІН В.В д-р техн. наук, професор, професор кафедри електропривода і автоматизації промислових установок Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна, *e-mail: zvv@zntu.edu.ua;*

АНТОНОВ М.Л. канд. техн. наук, доцент кафедри електропривода і автоматизації промислових установок Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна, *e-mail: nick@nickanto.info;*

КРИСАН Ю.О. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електропривода і автоматизації промислових установок Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна, *e-mail: krisan@mail.com.*

Мета роботи. *Дослідження впливу різкозмінного електричного навантаження на нестаціонарні електромагнітні явища та електромеханічні процеси у синхронному електроприводі.*

Методи дослідження. *Теоретичні та експериментальні методики дослідження і аналізу сукупності параметрів різкозмінних навантажень електротехнологічних комплексів і електромагнітних процесів в електрообладнанні; фізико-аналітичні методики для отримання залежності впливу електротехнологічних навантажень на технічний стан, аварійність електрообладнання, додаткові втрати та нестаціонарних електромагнітних явищ в системах і обладнанні.*

Отримані результати. *Виконано розрахунки перевищення коливальних процесів валу синхронного електроприводу, які збуджуються різкозмінними навантаженнями, відносно нормованих державними стандартами. Виходячи з першорядних вимог електроприводу і забезпечення нормованих коливань валу двигуна і зростаючих вимог до надійності, ефективності та зниження енерговитрат на одиницю вироблюваної продукції було досліджено вплив нестаціонарних електромагнітних процесів на електромеханічні параметри електроприводу.*

Наукова новизна. *Запропоновано математичну методику нестаціонарних електромагнітних процесів в синхронному електроприводі, яка дозволяє досліджувати вплив несинусоїдальності і несиметрії струмів і напруг на електромеханічні параметри. Наведено інженерну методику оцінки коливальної функції валу залежно від характеру нестаціонарних електромагнітних процесів в синхронному електродвигуні.*

Практична цінність. *Запропоновано інженерну методику оцінки коливань валу синхронного електроприводу при нестаціонарних електромагнітних процесах, що призводять до збільшення показників нормативно-технічної документації.*

Ключові слова: *нестаціонарні електромагнітні процеси; синхронний електропривод; різкозмінне навантаження; математична модель; механічні коливання; нормуючи показники.*

INFLUENCE OF NON-STATIONARY ELECTROMAGNETIC PROCESSES ON ELECTROMECHANICAL PARAMETERS IN A SYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE

ZINOVKIN V. Professor, Doctor of Technical Sciences, Zaporozhye National Technical University, Ukraine, *e-mail: zvv@zntu.edu.ua;*

ANTONOV N. Ph.D, Zaporozhye National Technical University, Ukraine, *e-mail: nick@nickanto.info*;

KRYSAN YU. Ph.D, Associate professor, Zaporozhye National Technical University, Ukraine, *e-mail: krisan@mail.com.*

Purpose. *Investigation of the influence of sharply variable electric load on non-stationary electromagnetic phenomena and electromechanical processes in a synchronous electric drive.*

Methodology. *Theoretical and experimental methods of research and analysis of a set of parameters of sharply varying loads of electrotechnological complexes and electromagnetic processes in electrical equipment; physical and analytical methods for obtaining dependencies of the influence of electrotechnical loads on the technical condition, the breakdown of electrical equipment, additional losses and non-stationary electromagnetic phenomena in systems and equipment.*

Findings. *The calculations of the excess of the oscillatory processes of the synchronous electric drive shaft are performed, which are excited by sharply varying loads, relative to the norms standardized by state standards. Proceeding from the primary requirements of the electric drive and providing normalized oscillations of the motor shaft and increasing requirements to reliability, efficiency and energy consumption per unit of output, the effect of non-stationary electromagnetic processes on the electromechanical parameters of the electric drive was investigated.*

Originality. *A mathematical technique is proposed for non-stationary electromagnetic processes in a synchronous electric drive, which allows one to investigate the effect of non-sinusoidal and unbalanced currents and voltages on electromechanical parameters. An engineering technique for estimating the oscillatory function of a shaft is given, depending on the nature of non-stationary electromagnetic processes in a synchronous motor.*

Practical value. *An engineering technique for estimating the oscillations of a synchronous electric drive shaft is proposed for non-stationary electromagnetic processes, which lead to an increase in the parameters of normative and technical documentation.*

Keywords: *non-stationary electromagnetic processes; synchronous electric drive; sharply varying load; mathematical model; mechanical vibrations; normalized indicators.*

REFERENCES

[1]. Postnikov I.M. (1960). Proektirovanie elektricheskih mashin. Kiev: Gostehizdat, 234.

[2]. Uajt D.(1964). Elektromehanicheskoe preobrazovanie energii. M.-L.: Jenergija, 240.

[3]. Zinovkin V.V. (2005). Nestacionarnye elektromagnitnye processy v elektrooborudovanii energoemkih elektrotehnologicheskih kompleksov s rezkopere-mennym harakterom nagruzki. *Radioelektronika, Informatika, Upravlinnja*, 2, 142 – 148. (in Russian.)

[4]. Zinovkin V.V. (2005). Verojatnostnye parametry rezkoperemennyh nagruzok energoemkih jelektrotehnologicheskih kompleksov. Praci IED NAN, 1(10), 136–144. (in Russian.)

[5]. Zinovkin, V., Volkova, O., & Karpenko, V. (2006). Investigation of electrothermic processes in contacts of switching devices under a current load. Electrical *Engineering And Power Engineering*, 2. 52-57 (in Russian.)

[6]. Trufanov I.; Metelskiy V.; Bogdanova L.; Krisan Y.; Shabliy M. (2002). Computer optimization on energy- and save resource expert system parameters of management electrosteel-smelting. *Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science IEEE* Cat. 02, 542, 207. doi: 10.1109/TCSET.2002.1015924.

[7]. Zabolotnyi, A., Fedosha, D., Yatsenko, A., & Kryvoruchenko, N. (2008). Improved method for forming potential of optimal structure of the distribution network. *Electrical Engineering And Power Engineering*, 1. 74-80.

[8]. Bezotosnyy, V.F., Vlasenko, E.V. (2004). Uchet energeticheskikh faktorov pri raschete namagnichennosti ferromagnitnykh materialov. *Electrical Engineering And Power Engineering*. 1. 13–17.

[9]. Zinovkin V.V., Zaluzhnyj M.Yu. (2003). Simulation modeling of non-stationary electromagnetic processes and their characteristics using the BOX POWER SUSTEM BOX POWER SUSTEM of the MATLAB package. *Problemy povyshenija jeffektivnosti jelektromehanicheskih preobrazovatelej v jelektrojenergeticheskih sistemah*, 75 – 80. (in Russian.)

[10]. Zaluzhnyi, M. (2009). Simulation of non-stationary electromagnetic processes in the system of electrical supply of energoemic electrotechnological complexes. *Electrical Engineering And Power Engineering*, 2. 70-73.

[11]. Antonov, N. (2008). Predicts ladder vector control stator current in the asynchronous electric drive with a simplified two-tier direct frequency converter. *Electrical Engineering And Power Engineering*, 1.37-48.

[12]. Kotsur, M. (2014). Features of the of thermal effect impact on the asynchronous motor with the modified pulse control system in conditions of frequent starts. *Electrical Engineering And Power Engineering*, 1, 32-36. DOI: 10.15588/1607-6761-2014-1-5

[13]. Yarymbash, S., Kylymnyk, I., & Yarymbash, D. (2010). Specific determination of equivalent circuit parameters in the furnace loop of the AC graphitizing furnace. *Electrical Engineering And Power Engineering*, 2, 36-43. DOI: 10.15588/1607-6761-2010-2-6

[14]. Lazarev V., Lazarev I. (2005). O prichine umen'shenija sil osevoj pressovki obmotok transformatorov pri korotkih zamykanijah. [About the reason of reduction of forces of axial pressing of windings of transformers at short circuits] *Electrical Engineering And Power Engineering*, 1. 18-22 (in Russian.)

[15]. Zinovkin V. & Kulinich E. (2009). Modeling of the automated electric drive of the doseter of the technological line of preparation of the gazobeton. *Electrical Engineering And Power Engineering*, 2. 49-53.

[16]. Milyih, V. I., Polyakova N. V. (2013) An analysis of harmonic composition the AC magnetic field associated with a rotating rotor turbine generator, at idle speed and short circuit modes, *Electrical Engineering And Power Engineerin*g, 2. 5–12. DOI: 10.15588/1607-6761-2013-2-1.

[17]. Yarymbash, D., Kotsur, M., Yarymbash, S., & Kotsur, I. (2016). Features of three-dimensional simulation of the electromagnetic fields of the asynchronous motors. *Electrical Engineering And Power Engineering*, 2, 43-50. DOI: 10.15588/1607-6761-2016-2-5

[18]. Postnikov I.M., Schastlivyj G.G. (1972). Rezul'taty i zadachi issledovanija elektromagnitnyh i teplovyh javlenij v koncevyh chastjah mashhnyh turbogeneratorov. *Vestnik AN USSR*. Naukova dumka. 8, 59-71. (in Russian.)

[19]. Sugimoto H., Tamai S. (1987). Secendary resistance identification of an induction motor applied model reference adaptive system and its characteristics. *IEEE Trans. Ind. Appl*. 296 – 303. DOI: 10.1109/TIA.1987.4504905

[20]. Islam, M. S., Islam, R., Sebastian, T. (2011). Experimental Verification of Design Techniques of Permanent-Magnet Synchronous Motors for Low-Torque-Ripple Applications. *IEEE Trans. Ind. Appl*. 88 – 95. DOI: 10.1109/ECCE.2009.5316068

[21]. Islam, M.S., Mir, S., Sebastian, T., Underwood, S. (2005). Design considerations of sinusoidally excited permanent-magnet Machines for low-torque-ripple applications. *IEEE Trans. Ind. Appl*. 955 – 962. DOI: 10.1109/TIA.2005.851026

[22]. Steven R. E. (1961). An experimental effective value of the guadratureaaxis synchronous reactance of sunchronous machine. *The Institution of electrcal endiners*. Paper, 3750, 54-58. DOI: 10.1049/pi-a.1961.0108

[23]. Pavljuk K., Bednarek S. (1971). Pusk i asinhronnye rezhimy sinhronnyh dvigatelej. M.: Energija, 270.

UDC 621.318.001.4

TOPOLOGICAL TRANSIENT MODELS OF THREE-PHASE FIVE-LIMB TRANSFORMER

ZIRKA S. E. Professor of the Department of Physics and Technology of the Dnipro National University, Dnipro, Ukraine, *e-mail: zirka@email.dp.ua*;

MOROZ Y. I. Ph.D., Associate professor of the Department of Physics and Technology of the Dnipro National University, Dnipro, Ukraine, *e-mail: yuriy_moroz@i.ua*;

ARTURI C. M. Professor of the Department of Electronics, Information and Bioengineering of the Politechnico di Milano, Milan, Italy, *e-mail: cesaremario.arturi@polimi.it;*

BONNMAN D. Ph.D., ABB AG, Bad Honnef, Germany, *e-mail: dietrich.bonmann@de.abb.com.*

Purpose. *To show capabilities of topological models of three-phase, five-limb transformer to correctly represent transformer operation in regimes with high flux densities in the core. As a practically important example, time domain response of transformer subjected to geomagnetically induced currents (GIC) is analyzed and compared with results of a comprehensive field experiment.*

Methodology. *Transformer magnetic model, which takes into account geometry of the core and windings, is transformed in a dual electric equivalent scheme, whose transient is calculated by using EMTP-ATP. The results obtained demonstrate the importance of incorporating the positive and zero sequence impedances of power network.*

Findings. *A simple and reliable model of five-limb transformer is proposed. It was found that the presence of the transformer tank can be effectively accounted for by linear inductances representing the paths of the off-core fluxes from yoke to yoke. The modeling of GIC events represented in the paper is the most accurate ever obtained for three-phase, five-leg transformers. The model is validated by close agreement of the predicted values and waveforms of the phase currents and reactive power with those measured in tests performed on two 400 MVA transformers connected back-to-back and to a 400 kV power network.*

Originality. *It is shown that a simplified non-hysteresis model developed portrays the behavior of the of five-limb transformer under GIC condition with the same good accuracy as its hysteresis model. Both the transformer models are well grounded. So, the paper dispels some misconceptions about the influence of the hysteresis properties of the core material and tank in transient modeling of five-leg transformers.*

Practical value. *The practical value and significance of the paper is caused by the fact that the model proposed is a simple and reliable tool for power system studies. The paper warns of using unnecessary complicated models whose parameters are difficult to be estimated by experiments or calculations.*

Key words*: five-limb transformer, topological transient models, transients, off-core magnetic fluxes, current waveforms, reactive power, experimental validation, back-to-back transformer test.*

I. INTRODUCTION

Over the last decades, a common practice in transient modeling of large power transformers is the use of their topological models [1] – [6]. The advantage of these low-frequency models is their ability to reproduce individually dynamic processes in the core limbs and yokes, as well as the off-core magnetic fluxes *outside* the windings. The latter feature becomes especially important when the core approaches saturation and some part of the flux leaves the core and closes through the air (oil) and transformer tank. The role of the off-core fluxes and thus the necessity for a detailed tank model is different for different transformer constructions. The off-core flux is significant in three-limb three-phase transformers, so a transient model of the tank was proposed in [4]. The lesser role of the tank in *five*-limb transformers is caused by the presence of the end (lateral) core limbs providing the paths for the unbalanced (zero-sequence) flux.

Perhaps the first topological model of the *five*-limb transformer, which covers the range of high flux densities, was proposed in [1], in which a discussion was raised concerning the necessity to model transformer tank. Because of the lack of experimental data, the "tank problem" for *large* transformers remained open up to now, although systematic measurements on *five-leg* transformers with saturated cores were reported in 2002 [7]. These measurements were carried out on two 400 MVA units connected back-to-back and to the Fingrid power network to simulate conditions experienced by transformers in the presence of geomagnetically-induced currents (GIC). The distinguishing feature of the work described in [7], is a large (up to 200 A) DC current injected in the transformers' neutrals and a considerable reactive power (55 Mvar) consumed by each of the transformers in this extreme regime.

Although the mentioning of the comprehensive experiment in [7] has become customary in the literature, there was no successful attempt to reproduce it with a model. An effort to repeat experimental results of [7] has been recently undertaken in [8]. However it will be shown in Section V that the outwardly plausible results represented in [8] were obtained due to deviations from the actual experimental conditions and hence cannot validate the "advanced" model [9], [10].

The aim of the present paper is to show that the measurements in [7] can be portrayed accurately by topological models developed in the framework of the conven-

© Zirka S. E., Moroz Y. I., Arturi C. M., Bonnman D., 2017
DOI 10.15588/1607-6761-2017-2-2

tional approach [1]–[5] if the network impedances are taken into account.

II. THE BACK-TO-BACK TRANSFORMER TEST

The experimental setup in fig. 1 consists of two similar YNyn0d11 400/400/125 MVA full transformers, T1 and T2, with rated voltages 410/120/21 kV. The medium-voltage (MV) 120-kV windings are nearest to the core, the high-voltage (HV) 410-kV windings are in the middle, and the outermost are the low-voltage (LV) 21-kV delta-connected windings. The turn numbers N_M, N_H, and N_L in these windings of T2 are 224, 766, and 68.

The welding generator G serves to inject the dc biasing current I_{dc} into the HV neutrals of both T1 and T2, thus providing the DC currents $I_{dc}/3$ in each of the HV windings.

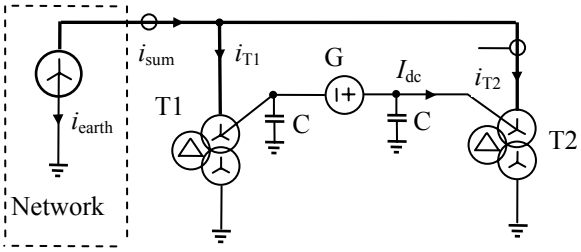


Figure 1. Experimental setup in [7].

Important elements of both the experimental setup and the corresponding model are shunt capacitors C, which form the AC earthing of the transformers and isolate the generator G from earth. Two current transformers are to monitor the variables designated in fig. 1. A summary of other transformer data and measurements can be found in [7].

III. TOPOLOGICAL TRANSFORMER MODEL

It was already noted in the literature that a lot of topological models exist for a given transformer configuration [11]. Some of them are unnecessary complicated and contain parameters difficult to be estimated by experiments or calculations. An example is the division of the yokes into sections [9], [11]; another one is the planar model in which the cover and bottom of the tank are represented by one-dimensional elements that results in the "tank", which consists of only the left and right walls [8]. As explained in [12], questionable is also the lumped character of the tank elements, and that each wound leg of the core has its own "tank" [10].

The tractable model employed in this paper is based on the magnetic circuit in fig. 2, which is a development of that described in [5]. To save space, only the elements related to the leg A are mainly shown in fig. 2. In particular, the sources of magnetomotive force (MMF) F_M, F_H, and F_L represent the MV, HV, and LV windings. The magnetic flux paths in the core are shown as solid rectangles, which represent the legs (elements R_a, R_b, R_c), yokes (R_{ab} and R_{bc}) and the end limbs (R_d and R_f). The innermost channel Leg-MV and the equivalent leakage channels MV-HV and HV-LV are characterized by the linear reluctances R_{01}, R_{12}, and R_{23} respectively. The negative (fictitious) reluctances R_p are added to match all three binary short-circuit inductances [2].

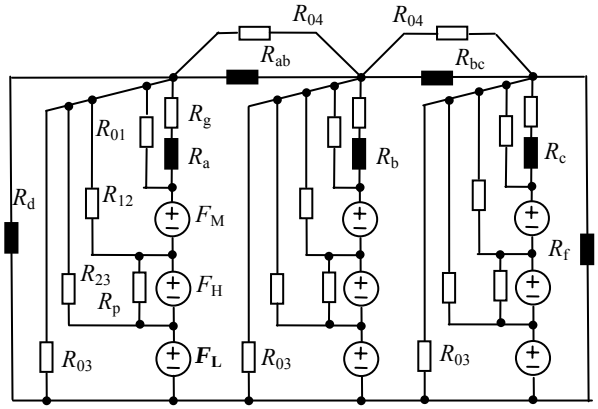


Figure 2. Magnetic (reluctive) transformer model.

Linear reluctances R_{03} represent the flux paths from yoke to yoke, which are outside the windings. Reluctances R_{04} are for fringing flux paths in parallel to the yokes. Reluctances $R_g = g/(\mu_0 S_{leg})$ take into account the air gaps g at the core joints, which are related to the legs with cross-section S_{leg}.

The electrical (duality-derived) equivalent of the model is shown in fig. 3 between the nine ideal transformers (ITs). The linear inductances L in fig. 3 are indexed with the same symbols as the linear reluctances R in fig. 2, and $L = N_H^2 / R$. The seven hysteretic elements are the ATPDraw implementations of the dynamic hysteresis model (DHM) [13]. The 1:1 turn ratio of three ITs at HV terminals points out that the model parameters are referred to N_H turns. So, the turn ratios n of the ITs at MV and LV terminals are N_M/N_H and N_H/N_L respectively.

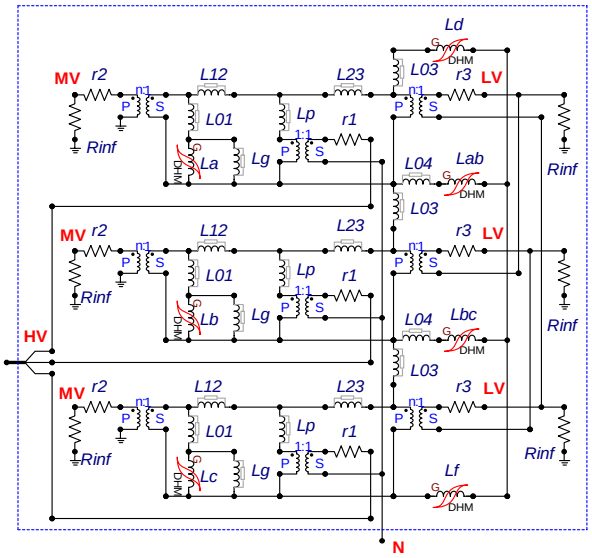


Figure 3. Electric transformer model.

As in many practical cases, it was not possible to determine the material of the core, so it was first assumed

that the cores of both transformers are assembled from grain-oriented steel 27ZDKH85. Then it was observed that the same results (the ones presented in the paper) are obtained when using AK steel H1 in transformer T1 and steel 27ZDKH85 in the T2 unit (the DHM-inductors of both these steels can be taken at [14] or in the current version of EMTP-ATP [15]).

The lengths of the legs, yokes, and lateral limbs of T2 are 3.340 m, 2.421 m, and 6.257 m respectively, their cross-sections are 0.8309 m^2, 0.4959 m^2, and 0.4155 m^2. Transformer T1 has 11 percent less cross sections and, respectively, larger turn numbers.

The percentage short circuit reactances of T2 provided in [7] yield the following binary short-circuit inductances referred to the HV side: L_{S12} = 263.5 mH, L_{S23} = 540.4 mH, and L_{S13} = 877.5 mH. The winding resistances r_1, r_2, and r_3 are brought outside the inductive part of the model. Their values in T2 are 0.34 Ω, 28 mΩ, and 16 mΩ respectively. Resistances of T1 are 30% greater. Resistances $R_{inf} = 10^9$ Ω make the MV windings effectively open-circuited and the delta LV windings unloaded, according to [7].

To match L_{S12}, L_{S23}, and L_{S13}, the conventional star-connected inductances L_{12}, L_{23}, and L_p are used in the model of fig. 3. The value of the *negative* inductance L_p is $(L_{S12} + L_{S23} - L_{S13})/2$ [4], then $L_{12} = L_{S12} - L_p$, and $L_{23} = L_{S23} - L_p$.

In the absence of winding design data, inductance L_{01} of the innermost channel Leg-MV was related to the short-circuit inductance L_{S12} of the next channel MV-HV. Following [3], the ratio $k_{01} = L_{01}/ L_{S12}$ can be evaluated by the insulating clearances of these channels, which are assumed proportional to the voltages across the channels. Taking into account the zero potential of the core, $k_{01} = V_M/(V_H - V_M) = 0.413$, which is rounded to 0.42.

The role of inductance L_{04} was explained in [4]. Since the modeled five-limb transformers have reinforced yokes ($A_{yoke} = 0.6\ A_{leg}$), the variation of L_{04} in the range $[0, L_{S12}]$ does not affect the model behavior, and L_{04} was set equal to L_{S12}.

So, the only fitting parameter of the model is the value of L_{03}. Similarly to L_{01} and L_{04}, it is related to L_{S12} by the ratio $k_{03} = L_{03} /L_{S12}$. In general, all three inductances L_{03} can be chosen individually, but for simplicity, they are assumed to be the same. The iterative search of L_{03} was resulted in $k_{03} = 14$ for transformer T2 and $k_{03} = 10$ for T1, which will be used in all calculations below.

IV. MODELING TECHNIQUE

The initial stage of the modeling is the fit of the transformer models to the measured no-load losses of T1 (172 kW) and T2 (100 kW). As proposed in [5], the model fitting to these losses is carried out by choosing the coefficient K_{loss} of the DHM. The reactive and hence the apparent power in the rated no-load regime can be fitted by changing the core air gaps *g*. We do not dwell on these details, because, as shall be shown below, the no-load losses do not practically influence the transformer behavior under large GICs.

As will be shown in the next section, it is important to take into account the positive (Z_1) and zero-sequence (Z_0) impedances of the power network. According to Fingrid evaluations at the time of the test [7], the per phase impedance Z_1 at f_1 =50 Hz is formed by R_1 = 10.54 Ω and L_1 = 181.3 mH. The impedance Z_0 was evaluated using the frequency content of the current in the earthling conductor of the equivalent network source in fig. 1. It was found by a Fourier analysis of the calculated earth current (current i_{earth} in fig. 1) that the third (150-Hz) harmonic distinctly dominates in its waveform. This is because, in the configuration considered, the current returning to the remote generator is the sum of currents in the neutrals of T1 and T2, and both of them are sums of three strongly asymmetrical (phase) currents shifted by 120 degrees that causes three positive and three negative peaks in their waveforms. This means that the network impedance $Z_{0(3)} = 748.7 \exp(j66.3°) = R_{0(3)} + j2\pi f_3 L_{0(3)}$ calculated by Fingrid for f_3 = 150 Hz should be used.

If the solver employed has a standard π-equivalent of the network, the values of R_1, L_1, $R_{0(3)}$, and $L_{0(3)}$ are entered directly into the window of this component. An alternative way of accounting for Z_0 is the use of the network equivalent in fig. 4 in which the boxes T1 and T2 contain transformer model shown in fig. 3.

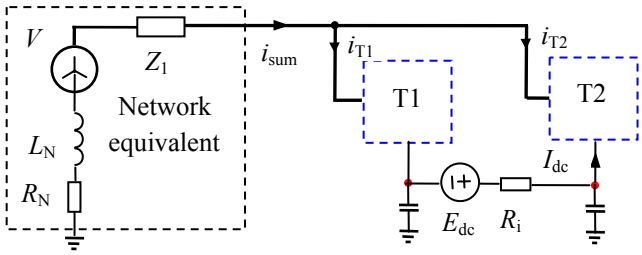


Figure 4. Model configuration employed.

Using the values $R_{0(3)}$ = 300.7 Ω, $L_{0(3)}$ = 727.5 mH, and the generic formula for ground-return impedance, $Z_N = (Z_0 - Z_1)/3$ [16], [17] the following network parameters should be used in fig. 4: R_N = 96.7 Ω and L_N = 182.1 mH. The elevated source voltage (V = 416 kV) is to compensate for the voltage drops over the network and provide the voltage (≈ 404 kV) observed across the modeled transformers at 200-A GIC. The value of the shunt capacitors *C* has not been documented, but this is not an influencing parameter if *C* > 100 μF. The current I_{dc} is determined by the voltage E_{dc} of the generator G, its internal resistance R_i, and resistances r_{11} and r_{21} of the HV windings of T1 and T2: $I_{dc} = E_{dc} / (R_i + r_{11}/3 + r_{21}/3)$.

In all the simulations below, a three-phase ramped voltage of the network is initially used in the model to establish symmetrical flux densities in the legs of both the transformers. To observe dynamics of GIC events, it is supposed that the GIC considered is initiated by a step voltage of generator G in fig. 4, which is switched on at *t* = 2 s. The following transient is characterized by a growth in the currents and the reactive power consumed by T1 and T2. The calculated rms values of the currents in phas-

es B and C of T2 as well as the reactive power Q_2 consumed by this transformer are shown in fig. 5. In steady state, the rms currents in fig. 5 reach 108 and 124 A, which are close to the measured values of 110 and 125 A (for phases B and C respectively). The steady state reactive power Q_2 is 53.1 Mvar that also is close to the measured 55 Mvar.

The waveforms of all three phase currents in the steady state (calculated in the presence of 200-A DC current) are shown in fig. 6. They agree quite well with the measured currents in fig. 7. The same good agreement was obtained for the current waveforms in the network (three-phase currents i_{sum} in fig. 4) so we do not show them in the paper.

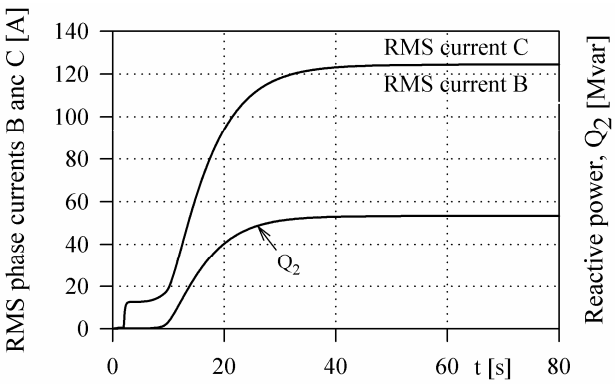


Figure 5. Calculated RMS currents in phases B and C of transformer T2 and the reactive power Q_2 consumed by T2 during the transient.

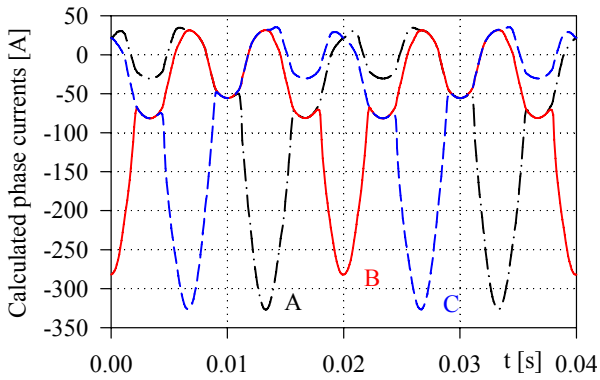


Figure 6. Calculated phase currents in T2.

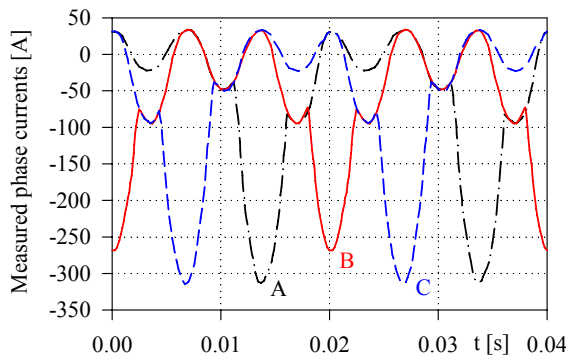


Figure 7. Measured phase currents in T2.

Figs. 8, 9, and 10 show calculated flux densities in the core leg, yoke, and the end limbs respectively.

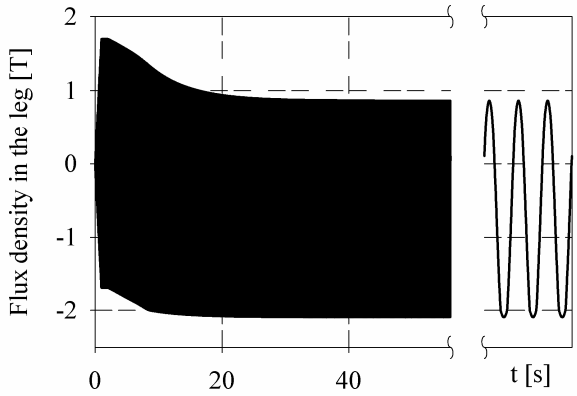


Figure 8. Flux density in the leg A.

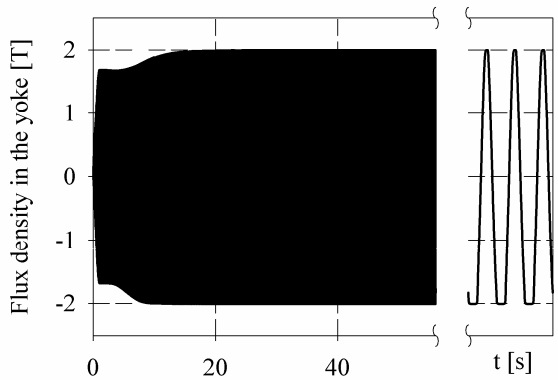


Figure 9. Flux density in the yoke AB.

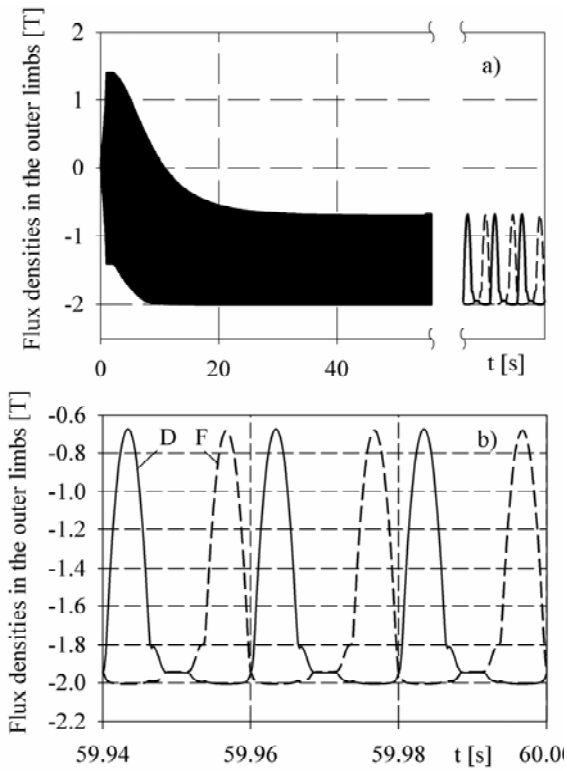


Figure 10. Flux densities in the outer limbs D and F during (a) transient and (b) steady state.

These demonstrate their different waveforms during the transient and steady state. As can be seen in fig. 10(b), the end limbs D and F are saturated non-simultaneously, and there is no point of time at which both B_D and B_F drop below –2 T. This shows that the zero-sequence flux closes mainly within the core and explains why there is no need for a detailed tank model when the five-leg transformer is considered as network element.

V. UNREALISTIC MODELING IN [8]

It should be recalled at this point that the influence of the network parameters (impedances Z_1 and Z_0) was not immediately evident, and considerable unsuccessful efforts were made to obtain the realistic waveforms in fig. 6 using the *initial* model configuration in fig. 1. The power network is represented in fig. 1 by an *ideal* voltage source, which was also used in [8]. The current waveforms in transformer T2 calculated for the initial configuration are shown in fig. 11.

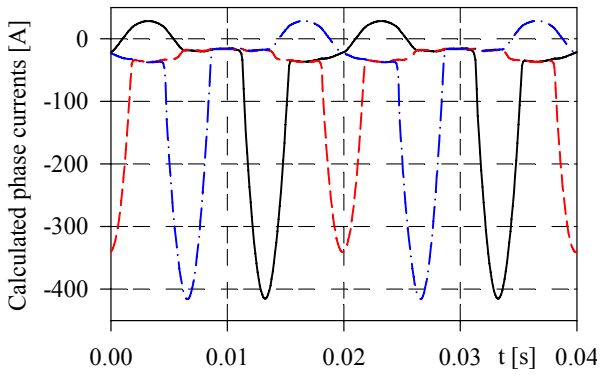


Figure 11. Phase currents in T2 calculated with the ideal network.

The currents in fig. 11 are markedly different from the measured currents in fig. 7. All our attempts to improve the waveforms in fig. 11 by changing the structure and parameters of the transformer model were in vain, pointing out that the reason lies outside the transformer representation.

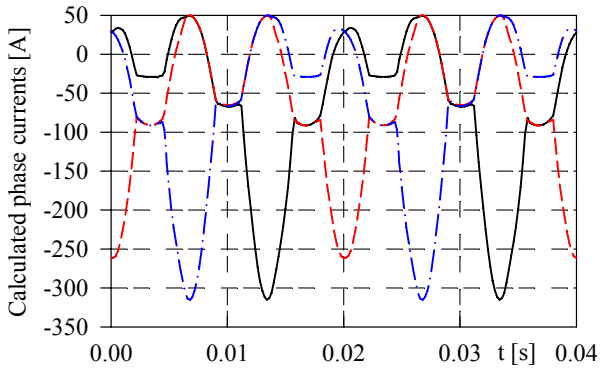


Figure 12. Phase currents in T2 calculated with ideal network and in the absence of earthing capacitors used in the measurements.

A pragmatic measure to circumvent this difficulty was observed by one of the co-authors (D.B.) and then used independently in [8]. This artificial measure is to substitute capacitors C in the scheme of fig. 1 with large resistances. The current waveforms calculated in the absence of capacitors C and for the idealized 400-kV network are shown in fig. 12.

The currents in fig. 12 and similar waveforms in [8] outwardly resemble the measured currents in fig. 7, but we should stress again that they were obtained using the model configuration different from that in the actual test [7] and hence cannot validate the "advanced" model [9], [10].

It should be noted that plausible currents in the HV windings of transformer T2 can also be simulated in the model configuration in fig. 13, which contains only *one* this transformer. In accordance with [8], an ideal voltage source V is used in this configuration (Z_1=0), and there are no grounding capacitances C. The latter simplification means that the internal inductance L_i of the welding generator G can be included in series with its resistance R_i. To obtain the needed current I_{dc} in the neutral, the e.m.f. E_{dc} in fig. 13 is set equal to $(r_{11}/3+R_i)\ I_{dc}$.

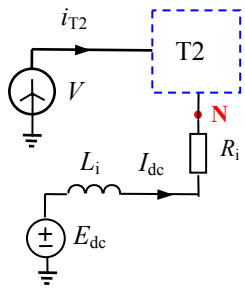


Figure 13. Model configuration with one transformer T2.

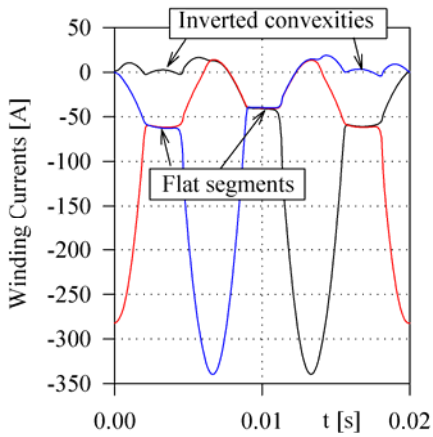


Figure 14. Phase currents of T2 calculated with the model configuration in fig. 13.

Steady-state currents in T2 calculated at V = 400 kV and L_i = 400 mH are shown in fig. 14. Although, in comparison to the waveforms in fig. 11, they are closer to the measured currents in fig. 7, these curves have flat segments and "inverted convexities", which are absent in the measured waveforms. The presence of similar segments

and convexities in the currents shown in [8, fig. 7] allows one to suppose that the analysis in [8] could be carried out for a model configuration similar to that in fig. 13, but not for the two-transformer arrangement in fig. 1.

Although the model configuration in fig. 13 does not reflect the actual test conditions in [7] where the impact of L_i is cancelled by capacitors C, the favorable influence of L_i in fig. 13 should be discussed further. It can be seen that all the elements of the circuit in fig. 13 are connected in series, so inductance L_i can be moved into the grounding conductor of the voltage source. In this case, inductance L_i takes the place and role of inductance L_N in the circuit of fig. 4. This explains the need for accounting for the zero-sequence impedance of the network implemented in the model configuration in fig. 4.

In concluding this section, we mention a separate study conducted to estimate the influence of hysteretic properties of the core material. With this purpose, each of the DHM-inductors in the model of fig. 3 was replaced by a lossless non-hysteretic inductance. The flux-current relationships of these inductances (different for legs and yokes) were obtained from the "middle" (anhysteretic) curves of the steel employed. It was found by numerical experiments that all the results calculated with non-hysteresis and hysteresis models practically almost coincide. It is remarkable that the coincidence was also obtained in portraying the "hysteresis loop" shown in fig. 10 of [7]. This shows that this loop is not caused by hysteresis properties of the core, but is a kind of Lissajous figure occurred due to the phase shift between the flux density of the leg and corresponding terminal current.

When the modeling of GIC events had been completed, it turned out that the model also predicts accurately the zero sequence impedances of the transformers measured from both HV and MV sides (they are 40.1% and 65.2% respectively).

VI. CONCLUSION

In addition to accuracy, an important feature of the transformer transient model intended for network studies is its simplicity and ease of implementation. It is always desirable to understand the capabilities of the models developed within the well-established framework, before proposing new, often unnecessary complicated tools. With this idea in mind, we have considered the capabilities of the conventional topological model of five-leg transformer in simulating transformer behavior at high flux densities in the core legs and yokes. In fitting the model, we used field test results from two 400 MVA transformers with 200-A DC currents entering their neutrals. It was found that accurate modeling of the test in [7] requires the network impedances to be taken into account, as well as the actual back-to-back connection of the transformers considered.

It was found that the presence of the tank can be effectively accounted for by linear inductances representing the off-core fluxes from yoke to yoke. This finding is not unexpected because the same conclusion was made in studying inrush current events in a three-limb Yyn transformer [5] in which an accurate tank model was anticipated due to the core design and higher flux densities in the core.

Having started with hysteretic transformer model, we have ended up with a simplified non-hysteretic model, which reproduces transformer currents and reactive power with the same good accuracy. This means that in its anhysteretic form, the model can be implemented in any computing environment, and the data provided in the paper is sufficient to repeat the calculated waveforms with the use of any circuit simulator.

The model is mainly a tool for power system studies, in which the application of finite-element models is inappropriate because of the computational cost and the presence of several transformers in the studied network.

REFERENCES

[1]. Arturi, C. M. (1991). Transient simulation of a three phase five limb step-up transformer following an out-of-phase synchronization. *IEEE Trans. Power* Delivery, 6, 1, 196 – 207. DOI: 10.1109/61.103738.

[2]. Chen, X., Venkata, S.S. (1997). A three-phase three-winding core-type transformer model for low-frequency transient studies. *IEEE Trans. Power* Delivery, 12, 2, 775 – 782. DOI: 0885-8977/97/$10.00.

[3]. Mork, B. A., Gonzalez, F., Ishchenko, D., Stuehm, D. L., Mitra J. (2007). Hybrid transformer model for transient simulation – Part I: Development and parameters. *IEEE Trans. Power* Delivery, 22, 1, 248 – 255. DOI: 10.1109/TPWRD.2006.883000.

[4]. Zirka, S. E., Moroz, Y. I., Arturi, C. M. (2014). Accounting for the influence of the tank walls in the zero-sequence topological model of a three-phase, three-limb transformer. *IEEE Trans. Power* Delivery, 29, 5, 2172–2179. DOI: 10.1109/ TPWRD.2014.2307117.

[5]. Zirka, S. E., Moroz, Y.I., Høidalen, H. Kr., Lotfi, A., Chiesa, N., Arturi, C. M. (2017). Practical experience in using a topological model of a core-type three-phase transformer – No-load and inrush conditions. *IEEE Trans. Power* Delivery, 32, 4, 2081–2090. DOI: 10.1109/TPWRD. 2016.2618900.

[6]. Tikhovod, S.M. (2014). Modelirovanie perehodnyh processov v transformatorah na osnove magnitojelektricheskih shem zameshhenija. [Modeling transformer transients using magnitoelectric equivalent schemes]. Elektrotehnika i elektroenergetika, 2, 59-68, (in Russian).

[7]. Lahtinen, M., Elovaara, J. (2002). GIC occurrences and GIC test for 400 kV system transformer. *IEEE Trans. Power* Delivery, 17, 2, 555–561. DOI: 0885-8977(02)02750-4.

[8]. Rezaei-Zare, A. Marti, L., Narang, A., Yan, A. (2016). Analysis of three-phase transformer response due to GIC using an advanced duality-based model. *IEEE Trans. Power* Delivery, 31, 5, 2342–2350.

DOI: 10.1109/TPWRD. 2015.2505499.

[9]. Rezaei-Zare, A. (2015). Enhanced transformer model for low- and mid-frequency transients–Part I: Model development. *IEEE Trans. Power* Delivery, 30, 1, 307–315. DOI: 10.1109/TPWRD.2014.2347930.

[10]. Rezaei-Zare, A. (2015). Enhanced transformer model for low- and mid-frequency transients–Part II: Validation and simulation results. *IEEE Trans. Power* Delivery, 30, 1, 316–325. DOI: 10.1109/TPWRD.2014.2347934.

[11]. Lambert, M., Mahseredjian, J. (2013) Electromagnetic transient type transformer models for geomagnetically-induced current (GIC) studies. EPRI Report 3002000832.

[12]. Zirka, S. E., Moroz, Y. I., Rahimpour, E. (2017). Towards a transformer transient model as a lumped-distributed parameter system. Compel, 36, 3, 741–750. DOI: 10.1108/COMPEL-09-2016-0389.

[13]. Zirka, S. E., Moroz, Y. I., Chiesa, N., Harrison, R. G., Høidalen, H. Kr. (2015). Implementation of inverse hysteresis model into EMTP – Part II: Dynamic model. *IEEE Trans. Power* Delivery, 30, 5, 2233–2241. DOI: 10.1109/TPWRD. 2015.2416199.

[14]. Moroz, Y. I., Zirka, S. E. (2014). Inverse models of magnetic hysteresis, [Online]. Available: https://sites.google.com/site/inverse-hysteresismodel.

[15]. Alternative Transients Program, ATP-EMTP, (2016). [Online]. Available: http://www.eeug.org.

[16]. Tleis, N. D. (2008). Power systems modelling and fault analysis: Theory and practice. New York: Newnes/Elsevier, 625.

[17]. Evdokunin, G. A. (2016). Jelektricheskie sistemy i seti [Electrical systems and networks]. Saint Petersburg: Rodnaya Ladoga, 384, (in Russian).

Manuscript received 01.10.2017

ТОПОЛОГІЧНІ МОДЕЛІ ТРИФАЗНОГО П'ЯТИСТРИЖНЕВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

ЗІРКА С. Є. — д-р техн. наук, професор, професор кафедри систем автоматизованого управління Дніпровського національного університету, Дніпро, Україна, *e-mail: zirka@email.dp.ua;*

МОРОЗ Ю. І. — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри систем автоматизованого управління Дніпровського національного університету, Дніпро, Україна, *e-mail: yuriy_moroz@i.ua*;

АРТУРІ Ц. М. — професор факультету електроніки, інформації і біоінженерії Міланського Політехнічного інституту, Мілан, Італія, *e-mail: cesaremario.arturi@polimi.it*;

БОННМАН Д. — д-р техн. наук, ABB, Бад-Гоннеф, Німеччина, *e-mail: dietrich.bonmann@de.abb.com.*

Мета роботи. *Показати, що на основі топологічних моделей трифазного п'ятистрижневого трансформатора можливо коректно відтворювати його роботу в режимах великих індукцій в осерді. В якості практично важливого прикладу, аналізується часовий відгук трансформатора на дію геомагнітно-індукованих струмів (ГІТ). Результати моделювання порівнюються з результатами натурного експерименту.*

Методи дослідження. *Магнітна модель трансформатора, що враховує геометрію осердя і обмоток, перетворюється в дуальну електричну схему заміщення, перехідний процес в якій розраховується в середовищі EMTP-ATP. Отримані результати демонструють необхідність урахування опорів прямої і нульової послідовності енергосистеми.*

Отримані результати. *Розроблено адекватну, просту і надійну модель п'ятистрижневого трансформатора. Встановлено, що присутність бака трансформатора може бути врахована за допомогою лінійних індуктивностей, що представляють шляхи магнітних потоків поза осердям (потоків від ярма до ярма). Точність представленого моделювання процесів в трансформаторі в присутності ГІТ перевищує точність відомих моделей трифазних п'ятистрижневих трансформаторів. Адекватність моделі підтверджується близькістю прогнозованих діючих значень і кривих фазних струмів, а також споживаної реактивної потужності, до відповідних величин, виміряних в експерименті, проведеному на двох 400 МВА трансформаторах, які були під'єднані паралельно до енергосистеми напругою 410 кВ і послідовно відносно джерела постійної напруги.*

Наукова новизна. *Розроблено спрощену безгістерезисну модель п'ятистрижневого трансформатора, яка відтворює поведінку трансформатора з такою ж високою точністю, що і гістерезисна модель, яка відрізняється тем, що вибір безгістерезисної моделі є науково обґрунтованим.*

Практична цінність. *Практична цінність і значимість статті обумовлено тим, що запропонована модель трансформатора являє собою простий і надійний інструмент для дослідження електричних мереж. Стаття застерігає від використання надмірно ускладнених моделей, параметри яких не можуть бути визначені в експерименті або знайдені шляхом розрахунків.*

Ключові слова: *п'ятистрижневий трансформатор, топологічні моделі, перехідний режим, магнітні потоки поза осердям, форми струмів, реактивна потужність, експериментальна перевірка, послідовно-паралельне включення.*

ТОПОЛОГИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ТРЕХФАЗНОГО ПЯТИСТЕРЖНЕВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

ЗИРКА С. Е. д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры систем автоматизированного управления Днепровского национального университета, Днепро, Украина, *e-mail: zirka@email.dp.ua;*

МОРОЗ Ю. И. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры систем автоматизированного управления Днепровского национального университета, Днепро, Украина, *e-mail: yuriy_moroz@i.ua*;

АРТУРИ Ц. М. профессор факультета элэктроники, информации и биоинженерии Миланского Политехнического института, Милан, Италия, *e-mail: cesaremario.arturi@polimi.it*;

БОННМАН Д. д-р техн. наук, ABB, Бад-Гоннеф, Германия, *e-mail: dietrich.bonmann@de.abb.com.*

Цель работы. *Показать, что на основе топологических моделей трехфазного пятистержневого трансформатора возможно корректно воспроизводить его работу в режимах больших индукций в сердечнике. В качестве практически важного примера, анализируется временной отклик трансформатора на воздействие геомагнитно-индуцированных токов (ГИТ). Результаты моделирования сравниваются с результатами натурного эксперимента.*

Методы исследования. *Магнитная модель трансформатора, учитывающая геометрию сердечника и обмоток, преобразуется в дуальную электрическую схему замещения, переходный процесс в который рассчитывается в среде EMTP-ATP. Полученные результаты демонстрируют необходимость учета сопротивлений прямой и нулевой последовательности энергосистемы.*

Полученные результаты. *Разработана адекватная простая и надежная модель пятистержневого трансформатора. Установлено, что присутствие бака трансформатора может быть учтено посредством линейных индуктивностей, представляющих пути магнитных потоков вне сердечника (потоков от ярма к ярму). Точность представленного моделирования процессов в трансформаторе при наличии ГИТ превышает точность известных моделей трехфазных пятистержневых трансформаторов. Адекватность модели подтверждается близостью предсказанных действующих значений и кривых фазных токов, а также потребляемой реактивной мощности, к соответствующим величинам, измененным в эксперименте, проведенном на двух 400 МВА трансформаторах, которые соединены параллельно к энергосистеме напряжением 410 кВ и последовательно по отношению к источнику постоянного напряжения.*

Научная новизна. *Разработана упрощенная безгистерезисная модель пятистержневого трансформатора, которая воспроизводит поведение трансформатора с той же высокой точностью, что и гистерезисная модель, отличающаяся тем, что выбор безгистерезисной модели научно обоснован.*

Практическая ценность. *Практическая ценность и значение статьи обусловлено тем, что предложенная модель трансформатора является простым и надежным инструментом для исследования электрических сетей. Статья предостерегает от использования излишне усложненных моделей, параметры которых не могут быть определены в эксперименте или посредством вычислений.*

Ключевые слова*: пятистержневой трансформатор, топологические модели, переходный режим, магнитные потоки вне сердечника, формы токов, реактивная мощность, экспериментальная проверка, последовательно-параллельное включение трансформаторов.*

УДК 621.316.13

АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ ЧАСТОТНОРЕГУЛИРУЕМОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИИ

ВОЛКОВ В.А. канд. техн. наук, докторант Национального горного университета, г. Днепр, Украина, *e-mail: green_stone@ukr.net*

Цель работы. *Получение аналитических зависимостей для расчета основных электромагнитных потерь энергии частотнорегулируемого асинхронного двигателя в режимах позиционирования с малыми перемещениями при различных видах (линейном, параболическом и квазиоптимальном) изменения его скорости.*

Методы исследования. *Методы подобия, дифференциального и интегрального исчисления, аналитической интерполяции, математического анализа.*

Полученные результаты. *Получены аналитические зависимости для расчета текущих электромагнитных потерь мощности и основных электромагнитных потерь энергии частотнорегулируемого асинхронного двигателя в режимах позиционирования с малыми перемещениями при различных видах (линейном, параболическом и квазиоптимальном) изменения его скорости. Получен универсальный вид аналитической зависимости для расчета оптимальных времен разгона и торможения частотнорегулируемого асинхронного двигателя при позиционировании с малыми перемещениями, соответствующий минимизации основных электромагнитных потерь энергии этого двигателя при указанном позиционировании для различных видов (линейном, параболическом и квазиоптимальном) изменения его скорости. Выполнена сравнительная количественная оценка изменения: оптимальных значений основных электромагнитных потерь энергии частотнорегулируемого асинхронного двигателя и соответствующих им максимальных значений скорости и оптимальных времен разгона и торможения, – в функции отрабатываемых заданных малых перемещений для рассматриваемых разных видов траекторий скорости двигателя.*

Научна новизна. *Впервые получены аналитические зависимости для расчета основных электромагнитных потерь энергии частотнорегулируемого асинхронного двигателя при позиционировании с малыми перемещениями в функции заданных значений перемещений вала двигателя и заданных значений его времен разгона и торможения при отработке упомянутых заданных перемещений. Впервые получены зависимости для количественной оценки минимальных основных электромагнитных потерь энергии асинхронного двигателя и соответствующих им максимальных значений скорости и оптимальных времен разгона и торможения в функции отрабатываемых заданных малых перемещений для линейной, параболической и квазиоптимальной траекторий скорости двигателя при позиционировании.*

Практическая ценность. *Полученные расчетные аналитические зависимости предназначены для количественной оценки основных электромагнитных потерь энергии частотнорегулируемого асинхронного двигателя в режиме малых перемещений. Посредством определения с помощью предложенных аналитических зависимостей максимальных значений скорости и оптимальных времен разгона и торможения частотнорегулируемого асинхронного двигателя достигается минимизация его основных электромагнитных потерь энергии при позиционировании для линейной, параболической и квазиоптимальной траекторий скорости.*

Ключевые слова: *асинхронный двигатель, частотное регулирование, электромагнитные потери энергии, позиционирование.*

I. ВВЕДЕНИЕ

Исходя из происходящего широкого применения во всех отраслях хозяйства частотнорегулируемых асинхронных электроприводов и наблюдающегося удорожания электрической энергии, в мире и Украине стала актуальной и остро востребованной практикой задача оценки и повышения энергоэффективности указанных электроприводов. Для этого необходимо осуществление количественной оценки в них непроизводственных потерь энергии (из которых, как известно, наибольшая часть приходится на основные электромагнитные потери энергии в асинхронном двигателе, вызванные основными гармоническими составляющими фазных статорных токов и потокосцеплений). Для выполнения упомянутой количественной оценки энергоэффективности, в свою очередь, требуется наличие расчетных зависимостей для основных электромагнитных потерь энергии в частотнорегулируемом асинхронном двигателе (ЧРАД). Причем полученные в аналитическом виде такие зависимости не только упрощают количественные расчеты потерь энергии, но и позволяют решить (с использованием методов математического анализа) в последующем оптимизационную задачу по минимизации непроизводительных потерь энергии в ЧРАД.

II. АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Из известных в отечественной и зарубежной научно-технической литературе публикаций, посвященных расчету энергетических режимов и потерь энергии для ЧРАД, в подавляющем большинстве рассматриваются расчеты применительно к установившимся режимам работы: для средних значений потребляемой

© Волков В. А., 2017
DOI 10.15588/1607-6761-2017-2-3

мощности и потерь мощности указанного двигателя [1] – [6] либо текущих (мгновенных) значений этих величин без учета [2], [7] или с учетом [2], [8] несинусоидальной формы фазных статорных токов ЧРАД (при питании от статических преобразователей частоты). При этом лишь в небольшой части из известных работ рассматриваются потери энергии для ЧРАД в динамических режимах: в пускотормозных режимах [9], [10] либо при позиционировании данного двигателя с малыми перемещениями [11] – [13].

Причем в последних упомянутых работах [11] – [13] проводимые в них исследования потерь энергии ЧРАД при позиционировании ограничиваются только нахождением электрических потерь энергии (от действия протекающих токов в статорной и роторной обмотках) двигателя, а магнитные потери энергии в двигателе – не учитываются. Это, очевидно, не позволяет количественно оценить общие электромагнитные потери в ЧРАД (а, следовательно, – дать объективную оценку энергоэффективности функционирования этого двигателя). Кроме того, в работах [11] – [13] определение значений электрических потерь энергии при позиционировании осуществляется путем численного интегрирования потерь электрической мощности данного двигателя, находящейся из соответствующей ей аналитической зависимости. Однако использование численных методов расчета (например, из [14] – [16]), которые стали широко применятся с развитием компьютерной техники, и полученных с их помощью численных результатов расчета потерь энергии имеет свой недостаток. А именно – они не позволяют (по сравнению с аналитическими зависимостями) провести с применением методов математического анализа последующую оптимизацию (минимизацию) указанных потерь энергии.

III. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью статьи является получение аналитических зависимостей для расчета основных электромагнитных потерь энергии частотнорегулируемого асинхронного двигателя в режимах позиционирования с малыми перемещениями при различных существующих видах (линейном, параболическом и квазиоптимальном) изменениях его скорости.

IV. ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

При дальнейших исследованиях приняты исходные допущения, идентичные рассмотренным в [16]. При этом объектом исследования являются режимы малых перемещений ЧРАД, характеризующиеся отсутствием ограничений основных рабочих координат (статорного тока, электромагнитного момента и скорости) двигателя (величины которых полагаются находящимися в пределах допустимых для них значений). Значения статического момента M_c и момента инерции J привода (приведенные к валу двигателя) в исследуемых режимах малых перемещений принимаются неизменными. Значение модуля потокосцепления ротора Ψ_r ЧРАД также полагается неизменным и равным своему номинальному значению $\Psi_{rн}$. Все последующие аналитические зависимости и расчеты приводятся в общепринятой для машин переменного тока системе относительных единиц [2], [6].

С учетом вышеизложенного в качестве исходных математических зависимостей для нахождения основных электромагнитных потерь мощности $\Delta P_{эм}$ и потерь энергии ΔW_p и ΔW_m в режимах малых перемещений используются следующие [16]:

$$\left.\begin{aligned} &\Delta P_{эм} = a + b\cdot\left[M_c + J\cdot(\alpha'')\right]^2 + c\cdot(\alpha')^{1,3} \\ &\Delta W_p = \int_0^{t_p} \Delta P_{эм}\cdot dt, \quad \Delta W_m = \int_0^{t_m} \Delta P_{эм}\cdot dt, \end{aligned}\right\} \quad (1)$$

где a, b, c – коэффициенты, определяемые через параметры двигателя в виде [9]:

$$\left.\begin{aligned} &a = (\Psi_{rн}/L_m)^2\cdot\left(R_s + 0{,}005\cdot P_н/\eta_н\right). \\ &b = \left(R_s + k^2 R_r + 0{,}005\cdot P_н/\eta_н\right)/\left(k_r^2\Psi_{rн}^2\right), \\ &c = \Delta P_{ст.н} \end{aligned}\right\}. \quad (2)$$

В данных зависимостях применяются обозначения: ΔW_p и ΔW_m – основные электромагнитные потери энергии (ОЭПЭ) двигателя, соответствующие отработке малого перемещения при режимах разгона (от нулевой до максимальной скорости, обозначенные индексом «*p*») и торможения (от максимальной до нулевой скорости, обозначенные индексом «*m*»); $\alpha' = d\alpha/dt$ и $\alpha'' = d^2\alpha/d^2t$ – соответственно первая и вторая производные по времени t от текущего значения положения α вала двигателя; $P_н$ и $\eta_н$ – номинальные значения соответственно полезной мощности на валу и коэффициента полезного действия двигателя; $\Delta P_{ст.н}$ и $\Psi_{rн}$ – номинальные значения соответственно потерь в стали и модуля обобщенного вектора потокосцепления ротора двигателя; R_s и R_r – активные сопротивления соответственно статорной и роторной (приведенной к статору) фазных обмоток двигателя; L_m и k_r – соответственно индуктивность намагничивания и коэффициент связи ротора ЧРАД.

После нахождения из (1) упомянутых составляющих ОЭПЭ ΔW_p и ΔW_m (соответствующих режимам разгона и торможения двигателя) значение ΔW_Σ общих ОЭПЭ для ЧРАД при отработке малого перемещения определяется для всех траекторий изменения скорости двигателя в виде суммы указанных составляющих [16]:

$$\Delta W_\Sigma = \Delta W_p + \Delta W_m. \quad (3)$$

На *первом этапе* выполним для ЧРАД аналитический расчет составляющих ОЭПЭ, соответствую-

щих в режиме малых перемещений линейному виду изменения скорости ω двигателя [16]:

$$\omega = \alpha'_p = \omega_{мр} \cdot \left(\frac{t}{t_p}\right) \quad \text{и} \quad \omega = \alpha'_m = \omega_{мт} \cdot \left(\frac{t}{t_m}\right) \quad (4)$$

при разгоне и торможении соответственно.

Здесь и далее: α_p и α_m – текущие значения положения вала ЧРАД (измеряемые от нулевых положений, соответствующих началу наступления режимов соответственно разгона и торможения); α'_p и α'_m – производные по времени от указанных выше текущих значений α_p и α_m положения; $\omega_{мр}$ и $\omega_{мт}$ – максимальные значения текущих скоростей ЧРАД соответственно в режимах разгона и торможения при малых перемещениях его вала; текущее время t при разгоне и торможении, отсчитываемое от начала и на протяжении интервалов разгона или торможения соответственно: $0 \le t \le t_p$ и $0 \le t \le t_m$ (где t_p и t_m – длительности времен разгона и торможения двигателя соответственно).

Взяв определенные интегралы от правых частей соотношений из (4) в пределах от нуля до текущего значения времени t, получим зависимости для нахождения текущих положений α_p и α_m вала двигателя при линейном виде изменения его скорости:

$$\alpha_p = \int_0^t \omega_{мр} \cdot \left(\frac{t}{t_p}\right) \cdot dt = \frac{\omega_{мр}}{2t_p} \cdot t^2 \quad (5)$$

– при разгоне или

$$\alpha_m = \int_0^t \omega_{мт} \cdot \left(\frac{t_m - t}{t_m}\right) \cdot dt = \frac{\omega_{мт}}{t_m} \cdot \left(t_m t - \frac{t^2}{2}\right) \quad (6)$$

– при торможении.

Для линейного вида изменения скорости заданные (конечные) перемещения α_p^* и α_m^* определяются при подстановке в интегральные соотношения из (5) и (6) величин верхних пределов: $t = t_p$ и $t = t_m$ соответственно и вычисляются из выражений:

$$\alpha_p^* = \frac{1}{2}\omega_{мр} \cdot t_p \quad \text{и} \quad \alpha_m^* = \frac{1}{2}\omega_{мт} \cdot t_m . \quad (7)$$

Обратим внимание на то, что при исходно принятом законе частотного управления (с постоянством потокосцепления ротора: $\Psi_r = \Psi_{rн} = const$) ЧРАД для всех видов изменения скорости (линейного, параболического и квазиоптимального) ее максимальные значения $\omega_{мр}$ и $\omega_{мт}$ должно находиться при отработке малых перемещений в следующих диапазонах: $0 \le \omega_{мр} \le 1$ о.е. и $0 \le \omega_{мт} \le 1$ о.е., – что обусловлено возможностью практической реализации упомянутого закона частотного управления [2].

Для всех траекторий изменения скорости ЧРАД суммарное отрабатываемое положение α_Σ^* вала двигателя при малом перемещении находится в виде:

$$\alpha_\Sigma^* = \alpha_p^* + \alpha_m^* . \quad (8)$$

Подставив в правые части соотношений (5) и (6) значения максимальных скоростей $\omega_{мр}$ и $\omega_{мт}$, выраженные из (7) через значения заданных положений α_p^* и α_m^*, получим зависимости для нахождения текущих значений положений α_p и α_m вала двигателя при линейном виде изменения его скорости:

$$\alpha_p = \alpha_p^* \left(\frac{t}{t_p}\right)^2 \quad (9)$$

– при разгоне или

$$\alpha_m = \alpha_m^* \left(\frac{2t_m \cdot t - t^2}{t_m^2}\right) \quad (10)$$

– при торможении.

Рассчитаем из (9) и (10) значения первых α'_p и α'_m и вторых α''_p и α''_m производных по времени t от текущих значений положений α_p и α_m:

$$\alpha'_p = \frac{2\alpha_p^* \cdot t}{t_p^2} \quad \text{и} \quad \alpha''_p = \frac{2\alpha_p^*}{t_p^2}, \quad (11)$$

$$\alpha'_m = \frac{2\alpha_m^* \cdot (t_m - t)}{t_m^2} \quad \text{и} \quad \alpha''_m = \frac{-2\alpha_m^*}{t_m^2}, – \quad (12)$$

соответствующие режимам разгона (обозначены индексом "p") и торможения (обозначены индексом "m") ЧРАД при линейном виде изменения скорости.

После подстановки вычисленных из (11) и (12) первых α'_p и α'_m и вторых α''_p и α''_m производных в первое соотношение из (1) получим аналитическую зависимость для нахождения текущих значений $\Delta P_{эм.р}$ и $\Delta P_{эм.т}$ основных электромагнитных потерь мощности ЧРАД в режиме малых перемещений:

$$\Delta P_{эм.р} = a + b\left(M_c + \frac{2J\alpha_p^*}{t_p^2}\right)^2 + \frac{c\left(2\alpha_p^* \cdot t\right)^{1,3}}{t_p^{2,6}} \quad (13)$$

– при разгоне или

$$\Delta P_{эм.т} = a + b\left(M_c - \frac{2J\alpha_m^*}{t_m^2}\right)^2 + \frac{c\left[2\alpha_m^* \cdot (t_m - t)\right]^{1,3}}{t_m^{2,6}} \quad (14)$$

– при торможении.

Подставив выражения (13) и (14) соответственно во второе и третье соотношения из (1) и вычислив в них определенные интегралы в пределах от нуля до значения времени разгона (или торможения) $t_{p,m}$, получим аналитическую зависимость для расчета ОЭПЭ при разгоне (или торможении) ЧРАД в режиме малых перемещений:

$$\Delta W_{p,m} = \left(a + bM_c^2\right) t_{p,m} \pm 4bM_c J \frac{\alpha^*_{p,m}}{t_{p,m}} + $$

$$+ 4bJ^2 \frac{\left(\alpha^*_{p,m}\right)^2}{t^3_{p,m}} + \frac{c\left(2\alpha^*_{p,m} \cdot t\right)^{1,3}}{2,3 \cdot t^{0,3}_{p,m}}, \qquad (15)$$

соответствующую линейному виду изменения скорости двигателя. В данной зависимости индекс "p" соответствует режиму разгона, а индекс "m" – режиму торможения; из двойных знаков перед третьим слагаемым в квадратные скобках: знак "+" соответствует разгону, а знак "–" торможению.

Анализ выражения (15) свидетельствует о том, что ОЭПЭ в режимах разгона и торможения при отработке ЧРАД малых перемещений содержат четыре слагаемых (составляющих), из которых: первая – прямо пропорционально зависит от значения времени $t_{p,m}$ разгона (или торможения), а вторая, третья и четвертая составляющие зависят обратно пропорционально соответственно от первой и третьей степени, а также от степени, равной 0,3, от значения времени $t_{p,m}$ разгона (или торможения) двигателя. Такой для выражения (15) математический вид (когда при значительном уменьшении или увеличением значений времен $t_{p,m}$ происходит увеличение величины ОЭПЭ $\Delta W_{p,m}$) вызывает наличие экстремума (миниммума) ОЭПЭ при определенных (оптимальных) значениях времен разгона (или торможения) двигателя.

Для нахождения экстремального (минимального) значения ОЭПЭ в режимах разгона и торможения при отработке малых перемещений ЧРАД возьмем производную от выражения (15) по времени $t_{p,m}$ разгона (или торможения) и приравняем к нулю:

$$\frac{d\left(\Delta W_{p,m}\right)}{d\left(t_{p,m}\right)} = y_л \mp 4bM_c J \frac{\alpha^*_{p,m}}{t^2_{p,m}} - 12bJ^2 \frac{\left(\alpha^*_{p,m}\right)^2}{t^4_{p,m}} = 0, \qquad (16)$$

где $y_л = a + bM_c^2 - \frac{3c}{23} \cdot \frac{\left(2\alpha^*_{p,m}\right)^{1,3}}{t^{1,3}_{p,m}}$. (17)

Преобразуем выражение (16) к виду уравнения второго порядка относительно переменной $t^2_{p,m}$:

$$t^4_{p,m} \mp \left(\frac{4bM_c J\alpha^*_{p,m}}{y_л}\right) \cdot t^2_{p,m} - \left[\frac{12bJ^2\left(\alpha^*_{p,m}\right)^2}{y_л}\right] = 0. \qquad (18)$$

Из решения уравнения (18) получим аналитическое расчетное выражение для определения оптимальных времен разгона (или торможения) двигателя:

$$t^o_{p,m} = \sqrt{\frac{J\alpha^*_{p,m}}{y_л}} \cdot \left[\pm 2bM_c + \sqrt{\left(2bM_c\right)^2 + 12b \cdot y_л}\right]^{0,5}, \qquad (19)$$

соответствующих отработке малых перемещений $\alpha^*_{p,m}$ при линейном виде изменения скорости ЧРАД.

При этом для примененых двойных знаков в формулах (15), (16), (18), (19): верхний знак соответствует режиму разгона, а нижний знак – режиму торможения двигателя. Оптимальные (минимальные) значения составляющих ОЭПЭ $\Delta W^o_{p,m}$ в режимах разгона (или торможения) ЧРАД при отработке заданного малого перемещения $\alpha^*_{p,m}$ находятся путем подстановки рассчитанного из (19) оптимального значения времени разгона (или торможения) $t^o_{p,m}$ в зависимость (15).

На *втором этапе* проведем для ЧРАД аналитический расчет составляющих ОЭПЭ, соответствующих в режиме малых перемещений параболическому виду изменения скорости ω двигателя [10]:

$$\left.\begin{aligned} \omega = \alpha'_p = \omega_{мр}\left[1 - \left(\frac{t_p - t}{t_p}\right)^2\right], \\ \omega = \alpha'_m = \omega_{мт} \cdot \frac{t^2_m - t^2}{t^2_m} \end{aligned}\right\} - \qquad (20)$$

при разгоне и торможении соответственно.

Взяв определенные интегралы от правых частей соотношений из (20) в пределах от нуля до текущего значения времени t, рассчитаем текущие положения α_p и α_m вала двигателя при параболическом виде изменения его скорости:

$$\alpha_p = \int_0^t \omega_{мр} \cdot \left[1 - \left(\frac{t_p - t}{t_p}\right)^2\right] \cdot dt = \frac{\omega_{мр}}{t^2_p} \cdot \left(t_p t^2 - \frac{t^3}{3}\right) \qquad (21)$$

– при разгоне или

$$\alpha_m = \int_0^t \omega_{мт} \cdot \left(\frac{t^2_m - t^2}{t^2_m}\right) \cdot dt = \frac{\omega_{мт}}{t^2_m} \cdot \left(t^2_m t - \frac{t^3}{3}\right) \qquad (22)$$

– при торможении.

Заданные (конечные) перемещения α^*_p и α^*_m для параболического вида изменения скорости опре-

деляются при подстановке в соотношения (21) и (22) величин верхних пределов: $t = t_p$, $t = t_m$ и вычисляются соответственно из выражений:

$$\alpha_p^* = \frac{2}{3}\omega_{мр} \cdot t_p \text{ и } \alpha_m^* = \frac{2}{3}\omega_{мт} \cdot t_m . \quad (23)$$

Подставив в правые части соотношений (21) и (22) значения максимальных скоростей $\omega_{мр}$ и $\omega_{мт}$, выраженные из (23) через значения заданных положений α_p'' и α_m'', получим аналитические зависимости для нахождения текущих значений положений α_p и α_m вала двигателя при параболическом виде изменения его скорости:

$$\alpha_p = \alpha_p^* \left[\frac{1{,}5 \cdot t_p \cdot t^2 - 0{,}5 \cdot t^3}{t_p^3} \right] \quad - \quad (24)$$

при разгоне;

$$\alpha_m = \alpha_m^* \left[\frac{1{,}5 \cdot t_m^2 \cdot t - 0{,}5 \cdot t^3}{t_m^3} \right] \quad - \quad (25)$$

при торможении.

Определим из (24) и (25) значения первых α_p' и α_m' и вторых α_p'' и α_m'' производных по времени t от текущих значений положения α_p и α_m:

$$\left.\begin{aligned} \alpha_p' &= \frac{d(\alpha_p)}{dt} = \frac{3\alpha_p^*}{2t_p}\left[1 - \left(\frac{t_p - t}{t_p}\right)^2\right], \\ \alpha_m' &= \frac{d(\alpha_m)}{dt} = \frac{3\alpha_m^*}{2t_m}\left(\frac{t_m^2 - t^2}{t_m^2}\right) \end{aligned}\right\}, \quad (26)$$

$$\left.\begin{aligned} \alpha_p'' &= \frac{d^2(\alpha_p)}{d^2 t} = \frac{3\alpha_p^*\left(t_p - t\right)}{t_p^3}, \\ \alpha_m'' &= \frac{d^2(\alpha_m)}{d^2 t} = -\frac{3\alpha_m^*}{t_m^3} \cdot t \end{aligned}\right\}, - \quad (27)$$

соответствующие разгону (обозначены индексом "p") и торможению (обозначены индексом "m") ЧРАД или параболическом виде изменения его скорости.

После подстановки вычисленных из (26) и (27) первых α_p' и α_m' и вторых α_p'' и α_m'' производных в первое соотношение из (1) получим аналитические зависимости для нахождения текущих значений $\Delta P_{эм.p}$ и $\Delta P_{эм.m}$ основных электромагнитных потерь мощности ЧРАД в режиме малых перемещений:

$$\Delta P_{эм.p} = a + b\left[M_c + \frac{3J\alpha_p^*(t_p - t)}{t_p^3}\right]^2 + c \cdot \left(\frac{3\alpha_p}{2t_p}\right)^{1,3} \cdot \left[1 - \left(\frac{t_p - t}{t_p}\right)^2\right]^{1,3} \quad (28)$$

- при разгоне или

$$\Delta P_{эм.m} = a + b\left[M_c - \frac{3J\alpha_m^*}{t_m^3} t\right]^2 + c \cdot \left(\frac{3\alpha_m}{2t_m}\right)^{1,3} \cdot \left(\frac{t_m^2 - t^2}{t_m^2}\right)^{1,3} \quad (29)$$

- при торможении.

Подставив выражения (28) и (29) соответственно во второе и третье соотношения из (1) и вычислив в них определенные интегралы в пределах от нуля до значения времени разгона (или торможения) $t_{p,m}$, получим аналитическую зависимость для расчета ОЭПЭ при разгоне (или торможении) ЧРАД при режиме малых перемещений:

$$\Delta W_{p,m} = \left(a + bM_c^2\right) t_{p,m} \pm 3bM_c J \frac{\alpha_{p,m}^*}{t_{p,m}} + 3bJ^2 \frac{\left(\alpha_{p,m}^*\right)^2}{t_{p,m}^3} + c\left(\frac{3\alpha_{p,m}^*}{2 \cdot t_{p,m}}\right)^{1,3} \cdot И_{p,m}, \quad (30)$$

соответствующую параболическому виду изменения скорости двигателя. В данной зависимости индекс "p" соответствует режиму разгона, а индекс "m" – режиму торможения; из двойных знаков: верхний знак соответствует разгону, а нижний знак – торможению.

Входящий в последнее слагаемое из (30) сомножитель $И_{p,m}$ вычисляется из соотношений:

$$И_p = \int_0^{t_p} \left[1 - \left(\frac{t_p - t}{t_p}\right)^2\right]^{1,3} \cdot dt - \quad (31)$$

при разгоне или

$$И_m = \int_0^{t_m} \left(\frac{t_m^2 - t^2}{t_m^2}\right)^{1,3} \cdot dt - \quad (32)$$

при торможении.

Вычисленные из (31) и (32) в функции времени $t_{p,m}$ и равные между собой (при одинаковых величинах времен разгона и торможения $t_p = t_m = t_{p,m}$) значения сомножителя $И_p = И_m = И_{p,m}$ показаны сплошной линией в виде графика на рис.1. На этом же рисунке пунктиром был показан график интерполированной кривой (совпавший со сплошной линией), рассчитываемой из аналитической зависимости:

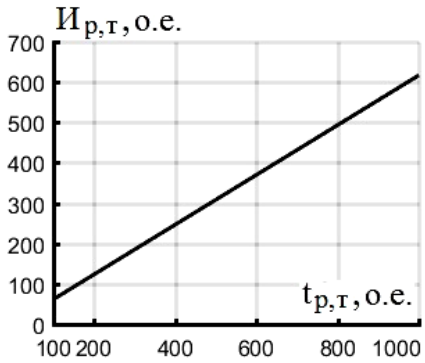


Рисунок 1. Расчетная зависимость $И_{p,m}\left(t_{p,m}\right)$

$$И_{p,m} \approx 0{,}6127 \cdot t_{p,m} \qquad (33)$$

Выявлено, что отклонения между вычисленными из (31), (32) и интерполированными из (33) значениями $И_{p,m}$ не превышают 0,001 о.е.

Для нахождения экстремального (минимального) значения ОЭПЭ в режимах разгона и торможения при отработке малых перемещениях ЧРАД возьмем с учетом (33) производную от выражения (30) по времени $t_{p,m}$ разгона (или торможения) и приравняем ее нулю:

$$\frac{d\left(\Delta W_{p,m}\right)}{d\left(t_{p,m}\right)} = y_n \mp 3bM_c J \frac{\alpha^*_{p,m}}{t^2_{p,m}} - 9bJ^2 \frac{\left(\alpha^*_{p,m}\right)^2}{t^4_{p,m}} = 0, \quad (34)$$

где

$$y_n = a + bM_c^2 + c \cdot \left(\frac{3}{2}\alpha^*_{p,m}\right)^{1,3} \cdot \frac{d}{d\left(t_{p,m}\right)}\left[\frac{И_{p,m}}{\left(t_{p,m}\right)^{1,3}}\right] \approx$$

$$\approx a + bM_c^2 - 0{,}1838 \cdot c \cdot \frac{\left(1{,}5 \cdot \alpha^*_{p,m}\right)^{1,3}}{\left(t_{p,m}\right)^{0,3}}. \qquad (35)$$

Преобразуем выражение (34) к виду уравнения второго порядка относительно переменной $t^2_{p,m}$:

$$t^4_{p,m} \mp \left(\frac{3bM_c J\alpha^*_{p,m}}{y_n}\right) \cdot t^2_{p,m} - \left[\frac{9bJ^2\left(\alpha^*_{p,m}\right)^2}{y_n}\right] = 0. \quad (36)$$

Из решения уравнения (36) получим аналитическое расчетное выражение для определения оптимальных времен разгона (или торможения):

$$t^o_{p,m} = \sqrt{\frac{J\alpha^*_{p,m}}{y_n}} \cdot \left[\pm 1{,}5bM_c + \sqrt{\left(1{,}5bM_c\right)^2 + 9b \cdot y_n}\right]^{0,5}, \quad (37)$$

соответствующих отработке малых перемещений $\alpha^*_{p,m}$ при параболической тахограмме ЧРАД.

При этом для двойных знаков в формулах (34), (36) и (37): верхний знак соответствует режиму разгона, а нижний знак – режиму торможения. Оптимальные (минимальные) значения составляющих ОЭПЭ $\Delta W^o_{p,m}$ в режимах разгона (или торможения) ЧРАД при отработке заданного малого перемещения $\alpha^*_{p,m}$ находятся путем подстановки рассчитанного из (37) оптимального значения времени разгона (или торможения) $t^o_{p,m}$ в зависимость (30).

На *третьем этапе* осуществим для ЧРАД аналитический расчет составляющих ОЭПЭ, соответствующих в режиме малых перемещений квазиоптимальному виду изменения скорости ω двигателя [10]:

$$\left.\begin{aligned} \omega = \alpha'_p = \omega_{мр}\left\{1 - \frac{sh\left[\xi^*\sqrt{K}\left(t_p - t\right)\right]}{sh\left(\xi^*\sqrt{K} \cdot t_p\right)}\right\}, \\ \omega = \alpha'_m = \omega_{мт}\left\{1 - \frac{sh\left(\xi^*\sqrt{K} \cdot t\right)}{sh\left(\xi^*\sqrt{K} \cdot t_m\right)}\right\} \end{aligned}\right\} \qquad (38)$$

при разгоне и торможении соответственно.

Взяв определенные интегралы от правых частей соотношений из (38) в пределах от нуля до текущего значения времени *t*, рассчитаем текущие положения α_p и α_m вала двигателя при квазиоптимальном виде изменения его скорости:

$$\alpha_p = \omega_{мр}\left\{t + \frac{ch\left[\xi^*\sqrt{K}\left(t_p - t\right)\right] - ch\left[\xi^*\sqrt{K} \cdot t_p\right]}{\left(\xi^*\sqrt{K}\right) \cdot sh\left(\xi^*\sqrt{K} \cdot t_p\right)}\right\} - \quad (39)$$

при разгоне или

$$\alpha_m = \omega_{мт}\left\{t - \frac{ch\left[\xi^*\sqrt{K} \cdot t\right] - 1}{\left(\xi^*\sqrt{K}\right) \cdot sh\left(\xi^*\sqrt{K} \cdot t_m\right)}\right\} - \quad (40)$$

при торможении.

Заданные (конечные) перемещения α^*_p и α^*_m для квазиоптимальной тахограммы определяются при подстановке в соотношения из (39) и (40) значений $t = t_p$ и $t = t_m$ и вычисляются из выражений:

$$\alpha^*_p = z_p \cdot \omega_{мр} \cdot t_p \quad \text{и} \quad \alpha^*_m = z_m \cdot \omega_{мт} \cdot t_m, \quad (41)$$

где значения коэффициентов z_p и z_m равны:

$$\left.\begin{aligned} z_p = 1 + \frac{1 - ch\left[\xi^*\sqrt{K} \cdot t_p\right]}{\left(\xi^*\sqrt{K} \cdot t_p\right) \cdot sh\left(\xi^*\sqrt{K} \cdot t_p\right)}, \\ z_m = 1 + \frac{1 - ch\left[\xi^*\sqrt{K} \cdot t_m\right]}{\left(\xi^*\sqrt{K} \cdot t_m\right) \cdot sh\left(\xi^*\sqrt{K} \cdot t_m\right)} \end{aligned}\right\}. \quad (42)$$

При этом, в отличие от постоянных значений коэффициентов (равных 1/2 и 2/3) согласно зависимостям (7) и (23) для линейного и параболического изменения скорости, при квазиоптимальном изменении скорости ЧРАД коэффициенты z_p и z_m в зависимо-

стях (41) и (42) переменны и зависят от длительностей времен разгона t_p и торможения t_m двигателя. На рис.2 построена рассчитанная из (42) для параметров электродвигателя АДО–2000-6000-12У1 графическая зависимость указанных коэффициентов: $z_{p.m} = z_p = z_m$ (равных между собой при одинаковых значениях времен разгона и торможения) в функции изменения указанных времен $t_{p,m}$ или параметра: $\xi^* \sqrt{K} \cdot t_{p,m}$. В последнем случае данная зависимость является, очевидно, универсальной для всех типов ЧРАД, с помощью которой определяются из (41) максимальные значения скоростей $\omega_{мр}$ и $\omega_{мт}$ при квазиоптимальной траектории скорости двигателя.

Подставив в правые части соотношений (39) и (40) значения максимальных скоростей $\omega_{мр}$ и $\omega_{мт}$, выраженные из (41) через значения заданных положений α_p^* и α_m^*, получим аналитические зависимости для нахождения текущих значений положений α_p и α_m вала двигателя при квазиоптимальном изменении его скорости:

$$\alpha_p = \frac{\alpha_p^*}{z_p}\left\{\frac{t}{t_p} + \frac{ch\left[\xi^*\sqrt{K}\cdot\left(t_p - t\right)\right] - ch\left[\xi^*\sqrt{K}\cdot t_p\right]}{\left(\xi^*\sqrt{K}\cdot t_p\right)\cdot sh\left(\xi^*\sqrt{K}\cdot t_p\right)}\right\} - \quad (43)$$

при разгоне или

$$\alpha_m = \frac{\alpha_m^*}{z_m}\left\{\frac{t}{t_m} - \frac{ch\left[\xi^*\sqrt{K}\cdot t\right] - 1}{\left(\xi^*\sqrt{K}\cdot t_m\right)\cdot sh\left(\xi^*\sqrt{K}\cdot t_m\right)}\right\} - \quad (44)$$

при торможении.

Вычислив из (43) и (44) первые α'_p и α'_m:

$$\left.\begin{aligned} \alpha'_p &= \frac{\alpha_p^*}{z_p\cdot t_p}\left\{1 - \frac{sh\left[\xi^*\sqrt{K}\cdot\left(t_p - t\right)\right]}{sh\left(\xi^*\sqrt{K}\cdot t_p\right)}\right\}, \\ \alpha'_m &= \frac{\alpha_m^*}{z_m\cdot t_m}\left\{1 - \frac{sh\left[\xi^*\sqrt{K}\cdot t\right]}{sh\left(\xi^*\sqrt{K}\cdot t_m\right)}\right\} \end{aligned}\right\} \quad (45)$$

и вторые производные α''_p и α''_m:

$$\left.\begin{aligned} \alpha''_p &= \frac{\alpha_p^*\left(\xi^*\sqrt{K}\right)}{z_p\cdot t_p}\cdot\left\{\frac{ch\left[\xi^*\sqrt{K}\cdot\left(t_p - t\right)\right]}{sh\left(\xi^*\sqrt{K}\cdot t_p\right)}\right\}, \\ \alpha''_m &= \frac{\alpha_m^*\left(\xi^*\sqrt{K}\right)}{z_m\cdot t_m}\cdot\left\{\frac{ch\left[\xi^*\sqrt{K}\cdot t\right]}{sh\left(\xi^*\sqrt{K}\cdot t_m\right)}\right\} \end{aligned}\right\} \quad (46)$$

по времени t от текущих положений α_p и α_m и подставив их первые соотношения из (1), получим аналитические зависимости для нахождения при квазиоптимальном виде изменения скорости двигателя текущих значений $\Delta P_{эм.р}$ и $\Delta P_{эм.т}$ основных электро-

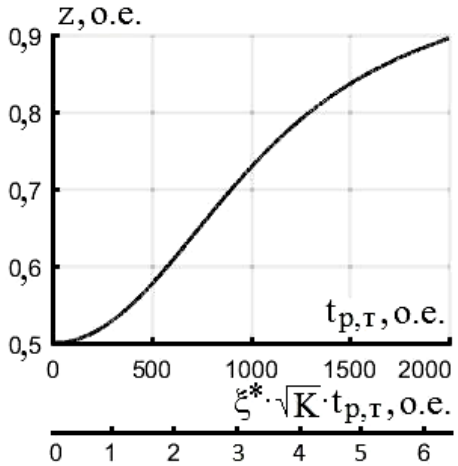


Рисунок 2. Расчетная зависимость $z_{p,m}\left(t_{p,m}\right)$

магнитных потерь мощности ЧРАД при разгоне и торможении в режиме малых перемещений (из-за чрезмерной сложности и громоздкости полученных зависимостей они не приводятся).

Путем последующего интегрирования из второго и третьего соотношения из (1) в пределах от нуля до заданных времен разгона t_p и торможения t_m с применением численных методов интегрирования [17] (вследствие упомянутой сложности и громоздкости полученных зависимостей для $\Delta P_{эм.р}$ и $\Delta P_{эм.т}$) рассчитываются численные значения составляющих ΔW_p и ΔW_m ОЭПЭ для ЧРАД в режиме малых перемещений, соответствующие разгону и торможению при квазиоптимальном виде изменения скорости двигателя. По причине отмеченной сложности аналитических выражений для текущих потерь мощности $\Delta P_{эм.р}$ и $\Delta P_{эм.т}$ и вынужденного использования численного расчета составляющих ΔW_p и ΔW_m ОЭПЭ для ЧРАД становится невозможным аналитически (с применением методов математического анализа) точно определить оптимальные значения времен разгона и торможения при малых перемещениях вала двигателя, соответствующие экстремальным (минимальным) значениям его указанных составляющих ОЭПЭ.

На *четвертом этапе* предложено, исходя из предыдущего, упрощенное аналитическое определение оптимальных времен разгона и торможения ЧРАД в режиме малых перемещений при квазиоптимальном виде изменения его скорости. Оно основано на использовании метода подобия [18]. В данном случае подобие аналитических зависимостей (19) и (37) для расчета оптимальных значений времен разгона (или торможения) $t_{p,m}^o$ в режиме отработки малых перемещений при линейном и параболическом видах изменения скорости ЧРАД состоит в схожести общего вида этих зависимостей, какие могут быть представлены следующими универсальными выражениями:

$$\left.\begin{aligned} t^{o}_{p,m} &= \sqrt{\frac{J\alpha^{*}_{p,m}}{y}} \cdot \left[\pm pbM_c + \sqrt{\left(pbM_c\right)^2 + qb \cdot y} \right]^{0,5}, \\ y &= a + bM_c^2 - \frac{s \cdot c \cdot \left(p \cdot \alpha^{*}_{p,m}\right)^{1,3}}{\left(t_{p,m}\right)^{1,3}}. \end{aligned}\right\} \quad (47)$$

В формулах (47) из используемых двойных знаков: верхний знак соответствует режиму разгона, и нижний знак – режиму торможения.

Отличие между собой в указанных зависимостях (19) и (37) или в (47) заключается только в различных численных значениях коэффициентов p, q и s. В частности, для линейного вида изменения скорости двигателя присущи значения: p = 2, q = 12, s = 3/23; а для параболического: p = 1,5, q = 9, s = 0,1838.

Данное подобие, очевидно, объясняется общими свойствами исследуемого объекта – ЧРАД. Исходя из метода подобия будем полагать, что универсальный вид зависимостей (47) сохранится и в случае определения из нее оптимальных времен разгона (или торможения) $t^{o}_{p,m}$ при квазиоптимальном виде изменения скорости двигателя, а отличие при этом будет состоять лишь в других численных значениях коэффициентов p, q и s в зависимостях (47).

Предлагается следующая методика нахождения указанных коэффициентов применительно к квазиоптимальному виду изменения скорости ЧРАД при отработке малых перемещений:

1) подставив ранее расчитанные из первого соотношения в (1) текущие значения основных электромагнитных мощностей $\Delta P_{эм.р}$ и $\Delta P_{эм.т}$ во второе и третье соотношения из (1) и варьируя значения времен $t_{p,m}$, вычислим численными методами для режима холостого хода (при $M_c = 0$), при половине номинальной нагрузки (для $M_c = 0{,}5M_н$) и для номинальной нагрузки (при $M_c = M_н$) соответствующие заданному отрабатываемому положению $\alpha^{*}_{p,m}$ и этим значениям времен и нагрузок величины составляющих ОЭПЭ $\Delta W_p\left(t_p\right)$ и $\Delta W_m\left(t_m\right)$ ЧРАД;

2) в результате указанного варьирования значений времен $t_{p,m}$ находим такие их оптимальные значения ($t^{o}_{p,m.xx}$ – для режимов разгона и торможения на холостом ходу; $t^{o}_{p,m}$ – для режимов разгона и торможения с половинной номинальной нагрузкой; $t^{o}_{p,m.н}$ – для режимов разгона и торможения с номинальной нагрузкой), при которых рассчитанные составляющие ОЭПЭ ΔW_p и ΔW_m минимальны (то есть, равны своим оптимальным значениям);

3) подставив в левую и правую части первой зависимости из (47) значения оптимального времени $t^{o}_{p,m.xx}$ и статического момент $M_c = 0$ (соответствующие холостому ходу) и повторив аналогичные подстановки в левую и правую части первой зависимости из (47) для: оптимального времен $t^{o}_{p,m}$ и статического момента: $M_c = 0{,}5M_н$ (соответствующих половине номинальной нагрузки), а также оптимального времени $t^{o}_{p,m.н}$ и статического момента $M_c = M_н$ (соответствующих номинальной нагрузке), – получим алгебраическую систему нелинейных уравнений третьего порядка, в которой неизвестными переменными величинами являются искомые коэффициенты: p, q, s;

4) преобразуем полученную алгебраическую систему уравнений к виду, удобному для вычисления искомых коэффициентов:

$$\left.\begin{aligned} p &= \left[\frac{\left(t^{o}_{p,m.н}\right)^4 y_н^2}{J^2\left(\alpha^{*}_{p,m}\right)^2} + q \cdot b \cdot y_н \right] \cdot \frac{J \cdot \alpha^{*}_{p,m}}{2M_н \cdot b \cdot \left(t^{o}_{p,m.н}\right)^2 \cdot y_н}, \\ q &= \frac{1}{b \cdot y} \left[\frac{\left(t^{o}_{p,m}\right)^4 y^2}{J^2\left(\alpha^{*}_{p,m}\right)^2} - \frac{2p\left(0{,}5M_н\right) \cdot b \cdot \left(t^{o}_{p,m}\right)^2 \cdot y}{J \cdot \alpha^{*}_{p,m}} \right], \\ s &= \left[a - \frac{q \cdot b \cdot J^2\left(\alpha^{*}_{p,m}\right)^2}{\left(t^{o}_{p,m.xx}\right)^4} \right] \cdot \frac{\left(t^{o}_{p,m.xx}\right)^{1,3}}{c \cdot \left(p \cdot \alpha^{*}_{p,m}\right)^{1,3}}, \end{aligned}\right\} \quad (48)$$

где значения параметров y и $y_н$ рассчитывались из второй зависимости в (47) для значений статического момента M_c, равных $0{,}5M_н$ и $M_н$ соответственно.

При этом обратим внимание на то, что анализ расчетных для оптимальных времен $t^{o}_{p,m}$ зависимостей (19), (37), (47) и (48) свидетельствует о том, что данные алгебраические уравнения и системы уравнений содержат переменные величины в левой и правой частях уравнений, а потому они решаются с использованием численных методов решения нелинейных алгебраических уравнений (метода итераций) [17].

В результате сравнения между собой значений оптимальных времен разгона (или торможения) $t^{o}_{p,m}$, вычисленных из аналитических зависимостей (19), (37), (47), и рассчитанных численными методами (при варьировании времен разгона и торможения, определении из (1) значений ОЭПЭ и нахождении соответствующих минимуму ОЭПЭ оптимальных времен разгона (торможения) для электродвигателя АДО-2000-6000-12У1 мощностью 2000 кВт), установлено, что их среднеквадратичное отклонение (при изменении значения статического момента M_c в диапазоне от нуля до номинального значения двигателя) не превышает 2%, что на практике вполне допустимо для инженерных расчетов.

На *пятом этапе* с использованием полученных

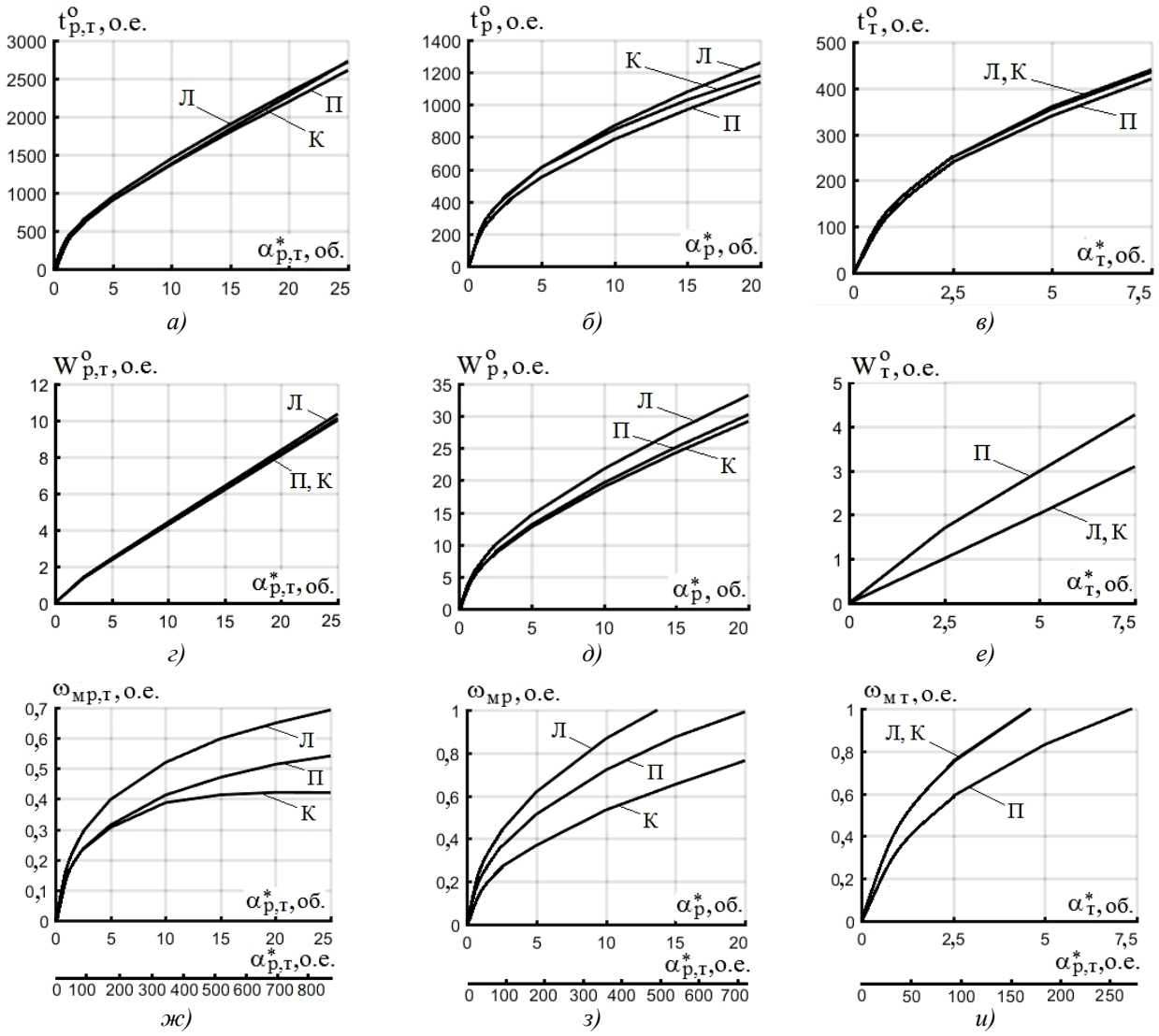


Рисунок 3. Зависимости: а,б,в – оптимальных времен $t^o_{p,m}$; г,д,е – основных электромагнитных потерь энергии $\Delta W^o_{p,m}$; ж,з,и – значений максимальных скоростей $\omega_{мр,т}$ ЧРАД, – при отработке малых перемещений (а,г,ж – при разгоне и торможении для $M_c = 0$; б,д,з – при разгоне для $M_c = M_н$; в,е,и – при торможении для $M_c = M_н$; Л, П, К – линейный, параболический и квазиоптимальный виды изменения скорости соответственно)

аналитических зависимостей (1), (15), (30) определим изменения оптимальных значений $\Delta W^o_{p,m}$ ОЭПЭ, а с применением соотношений (19), (37), (47) – соответствующих им оптимальных времен $t^o_{p,m}$ разгона (торможения) в функции отрабатываемых малых перемещений α^*_p и α^*_m при линейном, параболическом и квазиоптимальном изменении скорости ЧРАД. На этом же этапе после подстановки найденных значений оптимальных времен $t_{p,m} = t^o_{p,m}$ в полученные аналитические зависимости (7), (23), (42) определим максимальные значения $\omega_{мр}$ и $\omega_{мт}$ скоростей ЧРАД в функции отрабатываемых перемещений α^*_p и α^*_m при линейном, параболическом и квазиоптимальном видах изменения его скорости.

На рис.3 представлены построенные на основе выполненных расчетов (для параметров электродвигателя АДО-2000-6000-12У1) графические зависимости упомянутых величин: $\Delta W^o_{p,m}$, $t^o_{p,m}$, $\omega_{мр}$ и $\omega_{мт}$, – в функции отрабатываемых заданных перемещений α^*_p и α^*_m (показанных в оборотах (об.), где 1об. = 37,7 о.е.) соответственно при разгоне и торможении двигателя. Для нахождения абсолютных значений представленных на рис.3 величин следует умножить полученные значения в относительных единицах на

соответствующие базисные величины (равные: $0{,}01/\pi$ рад./с – для времени; 8,5885 кДж – для энергии; $50\pi/3$ рад./с – для скорости).

V. ВЫВОДЫ

1. Полученные в аналитическом виде зависимости (13) – (15) и (28) – (30) позволяют осуществить расчеты основных электромагнитных потерь мощности и энергии ЧРАД при отработке малых перемещений для линейного и параболического видов изменения скорости двигателя.

2. Полученные аналитические зависимости (45), (46) для вычисления значений первой и второй производных от текущего положения вала двигателя при квазиоптимальном виде изменения скорости ЧРАД позволяют путем подстановки их в соотношения из (1) рассчитать численными методами основные электромагнитные потери мощности и энергии этого двигателя при отработке малых перемещений с указанным видом изменения скорости.

3. На основе упомянутых полученных аналитических зависимостей для расчета основных электромагнитных потерь энергии ЧРАД определены в аналитическом виде математические соотношения (19), (37) и (47), позволяющие рассчитать оптимальные значения времен разгона и торможения ЧРАД, при которых обеспечиваются минимальные значения ОЭПЭ при отработке малых перемещений в режимах разгона и торможения для линейного, параболического и квазиоптимального видов изменения скорости этого двигателя.

4. На основе полученных аналитических зависимостей впервые выполнено для линейного, параболического и квазиоптимального изменения скорости двигателя сравнительная количественная оценка изменения: оптимальных значений ОЭПЭ двигателя и соответствующих им максимальных значений скорости и оптимальных времен разгона и торможения, – в функции отрабатываемых заданных малых перемещений, что позволяет выбрать рациональный вид тахограммы ЧРАД при режимах его позиционирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1]. Булгаков А.А. Частотное управление асинхронными электродвигателями / А.А. Булгаков. – М.: Наука 1996. – 298с.

[2]. Пивняк Г.Г. Современные частотно-регулируемые асинхронные электроприводы с широтно-импульсной модуляцией / Г.Г. Пивняк, А.В. Волков. – Днепропетровск: Национальный горный университет, 2006. – 470с.

[3]. Поляков В.Н. Экстремальное управление электрическиим двигателями / В.Н. Поляков, Р.Т. Шрейнер.–Екатеринбург:УГТУ–УПИ,2006– 420с.

[4]. Радин В.И. Электрические машины: асинхронные машины: Учеб. для электромех. спец. вузов / В.И. Радин, Д.Э. Брускин, А.Е. Зорохович: Под.ред. И.П. Копылова. – М.: Высш.шк., 1988. – 328с.

[5]. Сандлер А.С. Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями / А.С. Сандлер, Р.С. Сарбатов. – М.: Энергия, 1974. – 328с.

[6]. Шрейнер Р.Т. Оптимальное частотное управление асинхронными электроприводами / Р.Т. Шрейнер, Ю.А. Дмитренко. – Кишинев: Штиинца, 1982. – 224с.

[7]. Ковач К.П., Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока / Пер. с нем. яз. – М.:Госэнергоиздат, 1963. – 744с.

[8]. Мэрфи Дж. Тиристорное управление двигателями переменного тока / Дж. Мэрфи. – М., Энергия, 1979. – 256с.

[9]. Волков А.В. Энергосберегающее управление скоростью частотно-регулируемого асинхронного двигателя в пускотормозных режимах / А.В. Волков, А.А. Колесников / Электротехника. – 2013. – № 5. – С.2 – 9.

[10]. Волков В.А. Энергосбережение в частотно-регулируемых асинхронных электроприводах посредством оптимизации времен их разгона и торможения / В.А. Волков / Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – 2017. – № 27 (1249). – С.258 – 263.

[11]. Петров Ю.П. Оптимальное управление электроприводом / Ю.П. Петров. – М.–Л.: Госэнергоиздат, 1961. – 187с.

[12]. Петров Ю.П. Оптимальное управление электроприводом с учетом ограничений по нагреву / Ю.П. Петров. – Л.: Энергия, 1971. – 144с

[13]. Толочко В.И. Оптимизация электропотребления позиционного электропривода с векторным управлением асинхронным двигателем / В.И. Толочко, П.И. Розкаряка, Г.С. Чекавский // Наукові праці Донецького національного технічного університету. – 2011. – № 11 (186). – С. 396 – 406.

[14]. Тиховод С.М. Усовершенствование итерационных методов решения систем нелинейных уравнений состояния магнитоэлетрических схем замещения / С.М. Тиховод // Електротехніка та електроенергетика.– 2015.– № 1. – С.30 – 46. DOI: http://dx.doi.org/ 10.15588/1607-6761-2015-1-8

[15]. Тиховод С.М. Метод ускоренного численного расчета переходных процессов в электрических цепях на основе аппроксимации решения алгебраическими полиномами / С.М. Тиховод, Т.М. Корнус, Д.Г. Паталах // Електротехніка та електроенергетика. – 2015. – № 2. – С.48 – 54. DOI: http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761- 2015-2-7

[16]. Волков В.А. Оптимальное и квазиоптимальное энергосберегающее управление положением частотнорегулируемого асинхронного двигателя / В.А. Волков // Електротехніка та електроенергетика. – 2016.– № 1. – С. 25–34. DOI: http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761- 2016-1-4

[17]. Кальницкий Л.А. Специальный курс высшей математики для вузов. Учеб. пособие / Л.А. Кальницкий, Д.А. Добротин, В.Ф. Жевержев. – М.: Высш.шк., 1976. – 389с.

[18]. Веников В.А. Теория подобия и моделирования / В.А. Веников. – М.: Высш.шк., 1976. – 479с.

Стаття надійшла до редакції 07.12.2017

АНІЛІТИЧНИЙ РОЗРАХУНОК ОСНОВНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ВТРАТ ЕНЕРГІЇ ЧАСТОТНОРЕГУЛЬОВАНОГО ДВИГУНА ПРИ ПОЗИЦІЮВАННІ

ВОЛКОВ В.О. канд. техн. наук, докторант Національного гірничого университету, г. Дніпро, Україна, *e-mail: green_stone@ukr.net*

Мета роботи. *Отримання аналітичних залежностей для розрахунку основних електромагнітних втрат енергії частотнорегульованого асинхронного двигуна в режимах позиціонування з малими переміщеннями при різних видах (лінійному, параболическому і квазіоптимальному) зміни його швидкості.*

Методи дослідження. *Методи подібності, диференціального та інтегрального числення, аналітичної інтерполяції, математичного аналізу.*

Отримані результати. *Отримано аналітичні залежності для розрахунку поточних електромагнітних втрат потужності і основних електромагнітних втрат енергії частотнорегульованого асинхронного двигуна в режимах позиціонування з малими переміщеннями при різних видах (лінійному, параболічному і квазіоптимальному) зміни його швидкості. Отримано універсальний вид аналітичної залежності для розрахунку оптимальних часів розгону і гальмування частотнорегульованого асинхронного двигуна при позиціонуванні з малими переміщеннями, яка відповідає мінімізації основних електромагнітних втрат енергії цього двигуна при зазначеному позиціонуванні для різних видів (лінійному, параболічному і квазіоптимальному) зміні його швидкості. Виконана порівняльна кількісна оцінка зміни: оптимальних значень основних електромагнітних втрат енергії частотнорегульованого асинхронного двигуна та відповідних їм максимальних значень швидкості і оптимальних часів розгону і гальмування, − в функції заданих малих переміщень, що відпрацьовуються, для розглянутих різних траєкторій швидкості двигуна.*

Наукова новизна. *Вперше отримано аналітичні залежності для розрахунку основних електромагнітних втрат енергії частотнорегульованого асинхронного двигуна при позиціонуванні з малими переміщеннями в функції заданих значень переміщень вала двигуна і заданих значень його часів розгону і гальмування при відпрацюванні згаданих заданих переміщень. Вперше отримані залежності для кількісної оцінки мінімальних основних електромагнітних втрат енергії асинхронного двигуна і відповідних їм максимальних значень швидкості і оптимальних часів розгону і гальмування в функції заданих малих переміщень, що відпрацьовуються, для лінійної, параболічної і квазіоптимальної траєкторії швидкості двигуна при позиціонуванні.*

Практична цінність. *Отримані розрахункові аналітичні залежності призначені для кількісної оцінки основних електромагнітних втрат енергії частотнорегульованого асинхронного двигуна в режимі малих переміщень. За допомогою визначення з використанням запропонованих аналітичних залежностей максимальних значень швидкості і оптимальних часів розгону і гальмування частотнорегульованого асинхронного двигуна досягається мінімізація його основних електромагнітних втрат енергії при позиціонуванні для лінійної, параболічної і квазіоптимальної траєкторій швидкості.*

Ключові слова: *асинхронний двигун, частотне регулювання, електромагнітні втрати енергії, позиціонування.*

ANALYTICAL CALCULATION OF THE BASIC ELECTROMAGNETIC LOSSES OF THE ENERGY OF THE FREQUENCY-REGULATED ASYNCHRONOUS ENGINE IN POSITIONING

VOLKOV V.A. PhD., Associate Professor, Doctoral Candidate of National Mining University, Dnepr, Ukraine, *e-mail: green_stone@ukr.net*

Purpose. *Obtaining analytical dependencies for the calculation of the main electromagnetic energy losses of a frequency-controlled induction motor in positioning modes with small displacements for various types (linear, parabolic and quasi-optimal) of its velocity variation.*

Methodology. *Similarity methods, differential and integral calculus, analytical interpolation, mathematical analysis.*

Findings. *Analytical dependencies for calculation of current electromagnetic power losses and basic electromag-*

netic energy losses of a frequency-controlled asynchronous motor in the modes of positioning with small displacements for various types (linear, parabolic and quasi-optimal) of its velocity are obtained. A universal form of the analytical dependence for calculating the optimal acceleration and deceleration times for a frequency-controlled asynchronous motor for positioning with small displacements, corresponding to minimization of the main electromagnetic energy losses of this engine with the indicated positioning for various species (linear, parabolic and quasi-optimal), is obtained. A comparative quantitative assessment of the change is made: the optimum values of the main electromagnetic energy losses of the frequency-controlled asynchronous engine and the corresponding maximum speed and optimal acceleration and deceleration times, in the function of the set prescribed small displacements for the various engine speed trajectories under consideration.

Originality. *For the first time, analytical dependencies for the calculation of the main electromagnetic energy losses of a frequency-controlled asynchronous motor are obtained for positioning with small displacements as a function of the set values of the movement of the motor shaft and the set values of its acceleration and deceleration times for the specified specified displacements. For the first time, dependences are obtained for a quantitative estimate of the minimum fundamental electromagnetic energy losses of an induction motor and the corresponding maximum speed and optimal acceleration and deceleration times in the function of the set given small displacements for a linear, parabolic and quasi-optimal trajectory of the engine speed during positioning.*

Practical value. *The calculated analytical dependencies obtained are intended for a quantitative estimation of the main electromagnetic energy losses of a frequency-controlled induction motor in the small-displacement mode. By determining, using the proposed analytical dependencies of the maximum speed values and the optimum acceleration and deceleration times of the frequency-controlled asynchronous motor, minimization of its main electromagnetic energy losses is achieved by positioning for linear, parabolic and quasi-optimal velocity trajectories.*

Keywords: *asynchronous motor, frequency regulation, electromagnetic energy losses, positioning.*

REFERENCES

[1]. Bulgakov A.A. (1966). Chastotnoye upravleniye asin-khronnymi elektrodvigatelyami, Moscow, Nauka, 1966, 298.

[2]. Pivnyak G.G., Volkov A.V. (2006). Sovremennyye chastotno-reguliruyemyye asinkhronnyye elektroprivody s shirotnoimpulsnoy modulyatsiyey, Dnepropetrovsk: Natsionalnyy gornyy universitet, 470.

[3]. Polyakov V.N. (2006). Ekstremal'noye upravleniye elek-tricheskimi dvigatelyami, Yekaterinburg: UGTU–UPI, 420.

[4]. Radin V.I., Bruskin D.E., Zorokhodich A.Ye. (1988). Elektricheskiye mashiny: asin-khronnyye mashiny: Ucheb. dlya elektromekh. spets. Vuzov, Pod red. N.P. Kopylova, Moscow, Vyssh.shk., 328.

[5]. Sandler A.S., Sarbatov R.S. Avtomaticheskoye chastotnoye upravleniye asinkhronnymi dvigatelyami, Moscow, Energiya, 1974, 328.

[6]. Shreyner R.T., Dmitrenko YU.A. (1982). Optimal'noye chastotnoye uprav-leniye asinkhronnymi elektroprivodami, Kishinev: Shtiintsa, 224.

[7]. Kovach K.P., Rats I. (1963). Perekhodnyye protsessy v mashinakh peremennogo toka, Per. s nem. yaz., Moscow: Gosenergoizdat, 744.

[8]. Merfi Dzh. (1979). Tiristornoye upravleniye dvigatelyami peremennogo toka, Moscow, Energiya, 256.

[9]. Volkov A.V., Kolesnikov A.A. (2013). Energosberegayushcheye upravleniye skorost'yu chastotnoreguliruyemogo asinkhronnogo dvigatelya v puskotormoznykh rezhimakh, Elektrotekhnika, 5, 2 – 9.

[10]. Volkov V.A. (2017). Elektrosberezheniye v chastotno-reguliruyemykh asinkhronnykh elektroprivodakh posred-stvom optimizatsii vremen ikh razgona i tormozheniya, Vísnik Natsíonal'nogo tekhníchnogo uní-versitetu «Kharkívs'kiy polítekhníchniy ínstitut», 27 (1249), 258-263.

[11]. Petrov YU.P. (1961). Optimal'noye upravleniye elek-troprivodom, Moscow-Leningrad, Gosenergoizdat, 187.

[12]. Petrov YU.P. (1971). Optimal'noye upravleniye elektroprivodom s uchetom ogranicheniy po nagrevu, Leningrad, Energiya, 144.

[13]. Tolochko V.I., Rozkaryaka P.I., Chekavskiy G.S. (2011). Optimizatsiya elektropotreble-niya pozitsionnogo elektroprivoda s vektornym upravleniyem asinkhronnym dvigatelem, Naukoví pratsí Donets'kogo natsíonal'nogo tekhníchnogo uníversitetu, 11 (186), 396 – 406.

[14]. Tikhovod S.M. (2015). Usovershenstvovaniye iteratsionnykh metodov resheniya sistem nelineynykh uravneniy sostoyaniya magnitoeletricheskikh skhem zameshcheniya, Elektrotekhníka ta elektroenergetika, 1, 30 – 46. DOI: http://dx.doi.org/10.15588/ 1607-6761-2015-1-8

[15]. Tikhovod S.M., Kornus T.M., Patalakh D.G. (2015). Metod uskorennogo chislennogo rascheta perekhodnykh protsessov v elektricheskikh tsepyakh na osnove approksimatsii resheniya algebraicheskimi polinomami, Elektrotekhníka ta elektroenergetika, 2, 48 – 54. DOI: http://dx.doi.org/10. 15588/1607-6761-2015-2-7

[16]. Volkov V.A. (2016). Optimalnoye i kvazioptimalnoye energosberegayushcheye upravleniye polozheniyem chastotnoreguliruyemogo asinkhronnogo dvigatelya, Elektrotekhníka ta elektroyenergetika, 1, 25 – 34. DOI: http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2016 -1-4.

[17]. Kalnitskiy L.A., Dobrotin D.A., Zheverzhev V.F. (1976). Spetsialnyy kurs vysshey matematiki dlya vuzov, ucheb. Posobiye, Moscow, 389.

[18]. Venikov V.A. (1976). Teoriya podobiya i modelirovaniya. Moscow, 479.

УДК 621.317.7.082.743:681.586.783

ТЕОРЕТИЧНЕ І ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ МАГНІТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СИСТЕМИ, ЩО СПРИЙМАЄ КРУПНІСТЬ ПІСКІВ ОДНОСПІРАЛЬНОГО КЛАСИФІКАТОРА

МАЦУЙ А. М. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри автоматизації виробничих процесів Центральноукраїнського національного технічного університету, Кропивницький, Україна, *e-mail:matsuyan@mail.ru*;

КОНДРАТЕЦЬ В.О. д-р техн. наук, професор, професор кафедри автоматизації виробничих процесів Центральноукраїнського національного технічного університету, Кропивницький, Україна, *e-mail:matsuyan@mail.ru*.

Мета роботи. *Метою роботи є створення магнітоелектричної системи з постійними магнітами, що сприймає крупність пісків односпірального класифікатора шляхом встановлення зв'язку вихідного сигналу з вимірюваною величиною, позбавлення впливу збурень на результат та обґрунтування її параметрів.*

Методи досліджень. *Проведені дослідження виконані на підставі використання методів теорії електротехніки, магнітних систем з постійними магнітами, гальваномагнітних перетворювачів, імовірностей, випадкових процесів, статистики, регресійного аналізу, чутливості, диференційного числення, магнетизму порід, визначення фізичних властивостей матричного матеріалу при включенні в нього домішок з іншими явно вираженими властивостями, класифікації продуктів збагачення.*

Отримані результати. *Математично описано процес швидкості зміни об'єму твердого в контрольованому об'ємі простору, через який рухається пісковий матеріал. Визначено межі величини контрольованого об'єму, при яких чутливість ще буде достатньо. Отримано теоретичні залежності швидкості зміни об'єму твердого в контрольованому об'ємі від крупності пісків при різних швидкостях. Встановлено, що стан контрольованого об'єму найкраще оцінювати магнітним методом. Розроблена магнітоелектрична система з постійними магнітами, яка має оптимальні значення параметрів і індукційну обмотку, що містить до 25000 витків, і в одному з полюсних наконечників якої в суцільному прорізі встановлено перетворювач Холла. Магнітна система біля повітряного зазора створює в матеріалі магнітне поле розмірами 5×20×60 мм практично однакової напруженості. Е.р.с. магнітоелектричної системи майже лінійно змінюється при зростанні крупності матеріалу. Вона залежить від вмісту магнітного заліза в твердому, що компенсується використанням сигналу перетворювача Холла. Кореляційний зв'язок між індукованою е.р.с. і крупністю пісків тісний, за характером відповідає теоретичній залежності.*

Наукова новизна. *Магнітоелектрична система для контролю середньозваженої крупності пісків односпірального класифікатора створена вперше і дозволяє розв'язати актуальну задачу автоматизації перших стадій подрібнення руди. Вперше отримана математична залежність між швидкістю зміни об'єму твердого в контрольованому об'ємі потоку і крупністю пісків, яка покладена в основу створення магнітоелектричної системи. Удосконалено магнітоелектричну систему виконанням конструктивних елементів, що створюють магнітне поле розмірами 5×20×60 мм, і введенням перетворювача Холла, який реагує на вміст магнітного заліза в твердому і дозволяє підвищити точність вимірювання.*

Практична цінність. *Практична цінність роботи полягає в тому, що обґрунтовано магнітоелектричну систему, яка дозволяє розробити засіб вимірювання середньозваженої крупності пісків у промислових умовах і шляхом автоматизації вплинути на зменшення собівартості залізорудного концентрату.*

Ключові слова: *магнітоелектрична система; індукційна обмотка; перетворювач Холла; піски класифікатора; середньозважена крупність.*

I. ВСТУП

Переважну більшість сировини для чорної металургії в Україні отримують збагаченням бідних залізних руд. Стандартна рудопідготовка передбачає подрібнення переважно у кульових млинах, широке застосування яких обумовлено низкою експлуатаційних та економічних переваг поряд з головним їх недоліком – високою питомою витратою енергії і низьким значенням механічного коефіцієнта корисної дії при утворенні нової поверхні, який не перевищує 1%. В наслідок цього на процеси подрібнення припадає 50…70% загальних капітальних і експлуатаційних витрат і найбільші витрати метала. При цьому більша частина енергії витрачається в першій стадії подрібнення, яка включає кульовий млин, що працює в замкненому циклі з односпіральним класифікатором. Саме вона порівняно з економічно розвиненими країнами суттєво впливає на більш високу собівартість продукції чорної металургії і її сировинної основи – концентрату в Україні і зниження конкурентоспроможності виробів галузі на світовому ринку.

Одним з напрямів зменшення собівартості концентрату є покращення автоматичного керування технологічними процесами, однак воно гальмується відсутністю ряду інформаційних засобів. Серед інших важливим технологічним параметром є розрідження пульпи в кульовому млині, яке залежить від крупності

© Мацуй А.М., Кондратець В.О., 2017
DOI 10.15588/1607-6761-2017-2-4

її шматків, однак нині враховується лише крупність вихідної руди, що надходить в млин, а розмір піскового продукту, який складає 100…200% від вихідного, зовсім не береться до уваги при керуванні. В наслідок неоптимального розрідження пульпи допускаються великі перевитрати електроенергії, куль, футеровки та недоотримується значна кількість готового продукту. Поряд з іншими інформаційними джерелами такого призначення засоби вимірювання крупності пісків односпіральних класифікаторів не розроблялися. Тому необхідно створити засіб вимірювання крупності пісків механічного односпірального класифікатора, який відкриває перспективу зменшення собівартості залізорудного концентрату.

II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Автоматизація контролю крупності руди дозволяє оперативно керувати роботою подрібнювальних і класифікуючих агрегатів. Одними з перших з'явилися автоматичні пристрої з автоматичним відбором проб пульпи і автоматизацією ручних процесів. Зокрема, відомий пристрій типу ГСА-1М [1]. Над такими пристроями продовжується робота і в теперішній час [2]-[4]. Дані підходи мають великий недолік – значне запізнювання інформацій та складність. В умовах вимірювання піскового навантаження їх використати не можливо.

Практично в цей же час було запропоновано пристрій статистичного аналізу гранулометричного складу типу «Мікрон» [5]. Мікрометричний щуп у ньому знаходиться в пульпі і виконує в ній зворотно-поступальний рух, здійснюючи 120 коливань за хвилину. Якщо частка твердого зажимається між основою і щупом, пристрій фіксує її розмір. Він визначає середню крупність матеріалу. Сучасним пристроєм цього типу є гранулометр ПИК-074 [5]. Він удосконалюється і може розрахунковим шляхом виокремлювати вихід двох класів крупності твердої фази пульпи в діапазоні від 0,028 до 1 мм. Середня квадратична похибка визначення контрольованої величини не перевищує 2% при зміні співвідношення рідке/тверде більш ніж в три рази.

На середині 60-х років минулого століття розробляються пристрої, в яких автоматично вимірюються ударні вібрації пружної пластини або стержня під дією потоку сипкого матеріалу [6]. Ці пристрої не здатні вимірювати крупність пісків односпірального класифікатора.

Відомі лазерні фотометричні аналізатори розміру частин твердого в пульпі [7]-[8] також не можливо використати для вимірювання крупності пісків односпірального класифікатора. Перспективним напрямом ефективного вимірювання гранулометричного складу пульпи є використання ультразвукового методу. В ультразвуковому гранулометрі вимірюється інтенсивність затухання ультразвуку певної однієї або двох частот при проходженні через пробу, яка залежить від розміру частин твердого та їх концентрації [9]. Основним обмеженням у використанні ультразвукового методу є його чутливість до наявності в потоці повітряних бульбашок і агрегатів у вигляді пластівців, а також до коливань густини і в'язкості середовища [10]. Пристрої даного типу також не можливо використати для вимірювання крупності пісків. Комбіновані пристрої, що поєднують ультразвукові вимірювання з контролем густини середовища також не можуть розв'язати цю задачу.

Перспективні сучасні візиометричні гранулометри [11]-[13] і ВАЗМ-1 [14], засоби, засновані на аналізі флуктуації сигналу тензодатчиків конвеєрних вагів [15] та підходи, засновані на використанні мінералогічних властивостей залізних руд [16], також не можливо пристосувати для вимірювання крупності пісків односпірального класифікатора.

Як показує аналіз, найбільш придатним є метод, що реалізується в магнітоіндукційному гранулометрі побудованому на базі магнітоелектричної системи з постійними магнітами [17]-[18]. Він заснований на вимірюванні флуктуацій магнітної проникності пульпи в магнітному полі перетворювача, яка залежить від крупності твердого в пульпі, яке містить феромагнітні вкрапленості, однак цей пристрій вимірював крупність пульпи у зливі спірального класифікатора, а піски відрізняються крупністю, обезводнені до 12% вмісту вологи і занадто в'язкі. Вони погано рухаються і сильно налипають, знаходяться практично у недоступних точках технологічного процесу. Концентрація частин твердого в них занадто велика. Тому за цих умов необхідно знайти зв'язок вихідного сигналу магнітоелектричної системи з середньою крупністю пісків, підхід стабілізації швидкості їх переміщення та нейтралізації впливу на вихідний сигнал змін вмісту магнітного заліза в твердому, розв'язати питання чутливості магнітної системи до відхилень часток твердого та обґрунтувати параметри магнітоелектричної системи з постійним магнітом. В зв'язку з цим тема статті є актуальною і потребує термінового розв'язання, оскільки відкриває перспективу зменшення собівартості залізорудного концентрату.

III. МЕТА РОБОТИ

Метою даної роботи є створення магнітоелектричної системи, що сприймає середньозважену крупність пісків односпірального класифікатора, шляхом встановлення зв'язку її вихідного сигналу з вимірюваною величиною, позбавленням впливу збурень на результат та обґрунтування параметрів магнітної системи з постійними магнітами та джерелами зняття інформації.

IV. ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ І АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Для витратоміра феромагнітної пульпи [19], віднесеного П.П Кремлівським до групи флуктуаційних [20], справедлива залежність

$$\sigma_{\dot{\xi}} = \frac{\upsilon - \upsilon_1}{k_1 k_2}\sqrt{\frac{n}{2}\left(2k_2^2 + k_1^2\right)}, \qquad (1)$$

яка описує середнє квадратичне відхилення (амплітуду) похідної випадкового процесу $\dot{\xi}(t)$ кількості, наприклад, однакових за розміром сферичних часток твердого при переміщенні потоку через контрольований невеликий об'єм простору ΔV. В залежності (1) υ – середня швидкість потоку пульпи, υ_1 – середня швидкість потоку пульпи, яка визначається порогом чутливості вимірювального пристрою; k_1, k_2 – незмінні коефіцієнти, що залежать від конструкції перетворювача і епюри швидкостей потоку; n – математичне сподівання кількості однакових за розміром і формою часток твердого у контрольованому об'ємі ΔV. Коефіцієнти k_1 і k_2 зв'язують параметри кореляційної функції, що входять до експоненціальної і гармонічної складових, з середньою швидкістю потоку. Вони передбачають незмінність математичного сподівання n і розміру сферичних часток твердого, що характерно для гідро- і пневмотранспортування ряду сипких матеріалів і пульп в окремих технологічних точках.

Якщо n є незмінною величиною, то за амплітудою $\sigma_{\dot{\xi}}$ похідної випадкового процесу $\dot{\xi}(t)$ відхилення часток твердого від математичного сподівання можливо точно вимірювати середню швидкість потоку, а при незмінному поперечному перерізі потоку - об'ємну витрату пульпи. У випадку вимірювання піскового продукту механічного односпірального класифікатора епюри швидкостей не буде, оскільки обезводнений матеріал наближається до сипкого. Тоді залежність (1) прийме вигляд

$$\sigma_{\dot{\xi}} = \frac{\upsilon}{k_1 k_2}\sqrt{\frac{n}{2}\left(2k_2^2 + k_1^2\right)}. \qquad (2)$$

Математичне сподівання кількості часток твердого в контрольованому об'ємі простору ΔV можна виразити залежністю

$$n = V_T / V_{ЧТ} = 6V_T / \pi d^3 , \qquad (3)$$

де V_T – об'єм твердого в контрольованому об'ємі ΔV; d – діаметр сферичної частки твердого. З врахуванням (3) залежність (2) прийме вигляд

$$\sigma_{\dot{\xi}} = \frac{\upsilon}{k_1 k_2}\sqrt{\frac{3V_T}{\pi d^3}\left(2k_2^2 + k_1^2\right)}. \qquad (4)$$

У випадку пульпи об'єм твердого V_T в контрольованому об'ємі ΔV може змінюватись, оскільки залежить від густини пульпи і густини руди. Якщо густина руди не змінюється, то у випадку піскового продукту, ущільненого подаючою спіраллю, об'єм твердого у контрольованому об'ємі ΔV буде практично незмінною величиною, тобто $\Delta V=const$. Приймемо додатково $\upsilon=const$. Тоді залежність (4) можливо розглядати при певних незмінних значеннях діаметра часток твердого d і відповідно значенням $\sigma_{\dot{\xi}}$ робити судження про кількість відхилених часток різного розміру від середнього значення. Однак сталі k_1 і k_2 раніше розглядалися при незмінній крупності твердого. В процесі лабораторних досліджень першої похідної випадкового процесу $\xi(t)$ на матеріалі з середньою крупністю 1,0 і 2,0 мм встановлено, що при зростанні розміру твердого частотний спектр $\sigma_{\dot{\xi}}$ практично не змінюється [17]. Враховуючи, що крупність твердого при цьому змінювалася в чотири рази, можливо коефіцієнти k_1, k_2 в (4) вважати такими, що від розміру подрібненого матеріалу в межах однієї технологічної точки не залежать. Тоді залежність (4) дозволяє за амплітудою першої похідної випадкового процесу $\xi(t)$ визначати кількість відхилених часток конкретної крупності d. Однак такий параметр виміряти не можливо. Тому перейдемо до об'єму, який можливо зафіксувати в таких середовищах. Для цього помножимо ліву і праву сторони рівняння (4) на об'єм частки твердого $V_{ЧТ}=\pi d^3/6$. В результаті у лівій частині (4) отримаємо першу похідну зміни об'єму твердого в часі, а праворуч – вираз для її визначення

$$\frac{dV_T}{dt} = \frac{\upsilon}{k_1 k_2}\sqrt{\frac{\pi d^3 V_T}{12}\left(2k_2^2 + k_1^2\right)}. \qquad (5)$$

Промоделюємо процес швидкості зміни об'єму твердого в часі в контрольованому об'ємі ΔV вимірюваного середовища при k_1=0,027 м, k_2= 0,0062 м, υ_1= 0,22 м/с, υ_2= 0,33 м/с, υ_3= 0,44 м/с, V_T=2197 мм^3 при зміні розміру сферичних часток d=1 мм; 1,5 мм; 2,0 мм; 2,5 мм; 3,0 мм. Результати математичного моделювання приведені на рис.1, з якого видно, що при різних швидкостях переміщення матеріалу повз контрольований об'єм ΔV характер зміни залежності залишається однаковим. Спостерігається незначна нелінійність залежностей, однак в конкретній технологічній точці діапазон зміни крупності подрібненої руди буде меншим і зміна dV_T/dt від d буде практично лінійною. Чутливість методу в кінці діапазону при великих крупностях матеріалу зі зменшенням швидкості переміщення відповідно склала 4435,12; 3326,34 і 2217,55 мм^2/с. Тобто, вона приймає найбільші значення при найбільшій швидкості переміщення матеріалу. При достатньо невеликих швидкостях переміщення матеріалу вона також, достатня, але, враховуючи порівняно невеликі швидкості переміщення пісків, бажано вживати заходи підвищення чутливості іншими підходами, наприклад, при виборі величини контрольованого об'єму і параметрів перетворювача.

Чутливість самого процесу $\xi(t)$ можливо визначити відповідно формулі [21]

$$\delta = \frac{\sqrt{2n}}{n} 100\% , \qquad (6)$$

де n – математичне сподівання числа часток в контрольованому об'ємі ΔV, шириною, що наближено дорівнює діаметру матеріалу, і площею, яка відповідає контрольованому поперечному перерізу потоку. Тобто, контрольований об'єм середовища може бути розширеним за рахунок нарощування елементарних об'ємів ΔV вздовж напряму руху потоку, які мають незмінну

площу контрольованого перерізу в потоці і ряд складових шириною, що наближено відповідає розміру подрібненого матеріалу.

Величина δ характеризує відносні зміни кількості часток матеріалу в елементарному об'ємі ΔV при його переміщенні. Якщо ця величина буде занадто малою, то зміни кількості часток зафіксувати не буде можливо. З залежності (6) видно, що з ростом n чутливість процесу буде зменшуватись. Аналіз показує, що при n≈100 максимальна чутливість δ складає близько 14%, при n≈1000 ця величина дорівнює 4…5%. Якщо n≈10000, найбільші зміни кількості шматків руди складають близько 1,5%. Тому найкращі результати можуть бути отримані при n≈100, стійке вимірювання можна здійснити при збільшенні n до 1000. Реальні вимірювання можливі до n≈1000. При подальшому збільшенні кількості часток матеріалу в елементарному об'ємі шириною близько d вимірювання можливо здійснити лише за допомогою складної і високостабільної апаратури. Враховуючи це, при розробці засобів необхідно відповідально відноситись до розмірів контрольованого об'єму в потоці і виходити з розміру твердого, характерного для даної точки технологічного процесу.

Встановлено, що для матеріалу, представленого сферичними шматками твердого однакового розміру, коефіцієнт розпушення складає 1,3514. Тоді частка твердого в певному об'ємі розпушеного таким чином матеріалу буде дорівнювати 0,74. Тобто, 26% об'єму будуть складати пустоти. Якщо елементарний об'єм при d=3 мм (у даній технологічній точці) буде мати розміри 3×20×50 мм, тобто, ΔV=3000 мм^3, то об'єм твердого в ньому буде V_T=2220 мм^3, що відповідає n=157 шт. Це забезпечить нормальну чутливість процесу $\xi(t)$, однак треба мати на увазі, що при відхиленні розміру матеріалу в бік збільшення, наприклад до d=3,5 мм, кількість часток в елементарному об'ємі не стане меншою 100. У даному випадку n=98,9≈99 шт. Такі параметри контрольованого елементарного об'єму ΔV можливо прийняти. Вони будуть гарантувати високу чутливість вимірювання.

Реалізувати даний підхід визначення крупності піскового продукту можливо непрямим методом контролю властивостей твердого в контрольованому об'ємі ΔV. Найбільш поширеними є методи теплопровідності, електропровідності, діелектричної та магнітної проникності. При значних швидкостях переміщення матеріалу інерційний метод теплопровідності використати не можливо. Крім того, він є достатньо енерговитратним. Аналіз показує, що електропровідність і діелектрична проникність сухих матеріалів, які входять в пульпу, змінюються в широких межах. Крім того, електропровідність і діелектрична проникність магнетиту і кварцу сильно змінюються при змочуванні їх водою, а електропровідність води, в свою чергу, значно залежить від її мінералізації і складу розчинених у ній солей [22]. Враховуючи сказане, контроль об'ємної концентрації твердого в контрольованому об'ємі практично не можливо здійснити за електропровідністю та діелектричною проникністю.

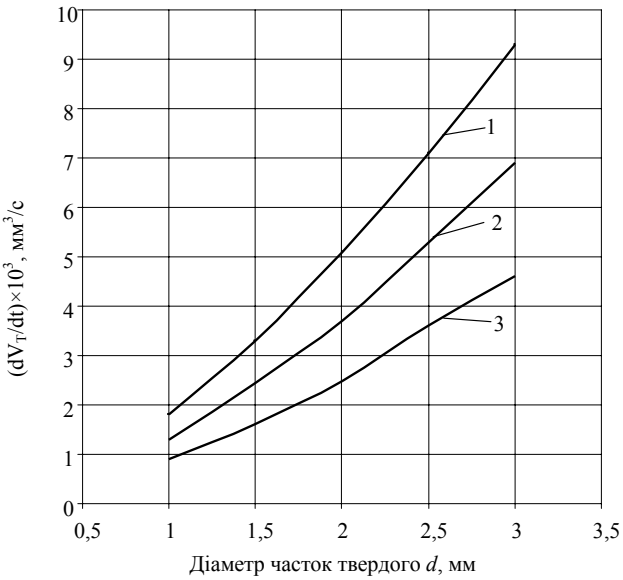


Рисунок 1. Залежність швидкості зміни об'єму твердого в контрольованому об'ємі середовища від діаметра часток руди при різних швидкостях:

1 – υ = 0,44 м/с; 2 – υ = 0,33 м/с; 3 – υ = 0,22 м/с

Значення магнітних проникностей діамагнітних і парамагнітних мінералів, що входять до складу твердої фази пульпи, і води незначно відрізняються між собою за величиною (μ=0,999836…1,0064) [22], їх суміш можливо умовно розглядати як однорідне середовище з постійною магнітною проникністю $\mu_{см}$. Оскільки магнітна проникність магнетиту значно більша магнітної проникності матриці і змінюється в неширокиx межах ($\mu_м$=6,5), зміна його об'ємної концентрації буде приводити до однозначної зміни магнітної проникності контрольованого об'єму.

Включення корисних компонентів в породах і частки, які отримують в подрібнювальних агрегатах, звичайно мають неправильну форму. Для гірських порід і продуктів подрібнення можливо допустити, що вони мають еліпсоїдальну форму [23] і наближено однакові розміри [24]. При хаотичній орієнтації і будь-якій концентрації таких часток твердого магнітну проникність μ контрольованого об'єму можливо визначати за формулою, запропонованою Вейнбергом А.К., в залежності від об'єму, який займають частки магнетиту. Залежність магнітної проникності $\mu_{см}$ від сумарного об'єму магнетитових включень, які містяться в контрольованому об'ємі, що визначається за даною формулою, близька до лінійної [23]. Реальні значення магнітної проникності нерухомого контрольованого об'єму, визначені за формулою [23], будуть дещо відрізнятися від знайдених за розрахунками, оскільки на величину магнітної проникності дещо впливає форма і розміри феромагнітних часток матеріалу [25].

При роботі це не буде здійснювати вагомого впливу зважаючи на те, що форма і розміри часток матеріалу для конкретної руди будуть практично незмінними.

В процесі руху подрібненого матеріалу через нерухомий контрольований об'єм разом зі зміною кількості часток руди в ньому буде змінюватися кількість, а як наслідок, і об'ємний вміст магнітних включень. Тобто, магнітна проникність контрольованого об'єму, через який рухається потік подрібненого матеріалу, буде змінюватись в часі пропорційно відхиленням об'єму твердого. Такий контрольований об'єм можливо використати в якості магнітного опору магнітної системи з постійними магнітами як це показано на рис.2.

Постійний магніт 1 (рис.2) з допомогою полюсних наконечників 2 створює магнітний потік Φ, який проникає через немагнітну струмонепровідну прокладку 3 товщиною a у матеріал 4, що рухається зі швидкістю υ. Матеріальний потік, рухаючись через нерухомий контрольований об'єм 5, в наслідок зміни магнітної проникності зосередженого в 5 твердого приводить до зімни магнітного потоку Φ_M в магнітній системі, який можливо перетворити у величину, зручну для подальшого використання. Об'єм 5 створюється завдяки повітряному зазора 6 довжиною l.

Досвід показує, що контрольований об'єм 5 у вигляді магнітного поля в рухомому потоці матеріалу зручно створювати двома полюсними наконечниками 2, які мають товщину крайок біля повітряного проміжку 2 мм, а біля джерела магніторушійної сили – 10 мм. Від крайок, розташованих біля матеріального потоку, товщина полюсних наконечників поступово зростає до 10 мм. Оптимальним кутом нахилу полюсних наконечників є кут φ, що дорівнює 45°. Ширину полюсних наконечників b_H вибирають з міркувань створення необхідного об'єму нерухомого контрольованого простору. Необхідну ширину нерухомого контрольованого об'єму створюють зміною параметра l (рис.2). Глибина проникнення магнітного поля в матеріал (третій вимір нерухомого контрольованого об'єму) забезпечується описаною конструкцією магнітної системи.

Магнітний потік Φ, як видно з рис.2, має дві складові. Напруженість магнітного поля в таких магнітних системах біля зазора нерівномірна. Максимальне її значення H_3 спостерігається безпосередньо в зазорі. З віддаленням вздовж нормалі від крайки зазора відбувається зменшення напруженості магнітного поля, яке можливо описати рівнянням

$$H_П = K_1 H_3 e^{-C_1 X} + K_2 H_3 e^{-C_2 X}, \qquad (7)$$

де K_1, K_2, C_1, C_2 – сталі коефіцієнти, які залежать від конструктивних параметрів магнітної системи; X – відстань від передньої крайки зазора до конкретної точки вздовж нормалі.

Значення напруженості магнітного поля в зазорі не можливо приймати достатньо великою, оскільки при цьому відбувається притягування і утримання магнітних часток подрібненого матеріалу біля зазора при вільному русі потоку. Це приводить до викривлення ідентифікації розглянутого випадкового процесу аж до повної відмови роботи магнітної системи. Отримати необхідну напруженість магнітного поля в зазорі при певній конструкції магнітної системи можливо підбором необхідної кількості стандартних постійних магнітів за допомогою відомих методик або експериментально. При цьому буде досягнуто мінімуму витрачання вартісного магнітного матеріалу в магнітній системі, яким може бути сплав ЮНДК-24.

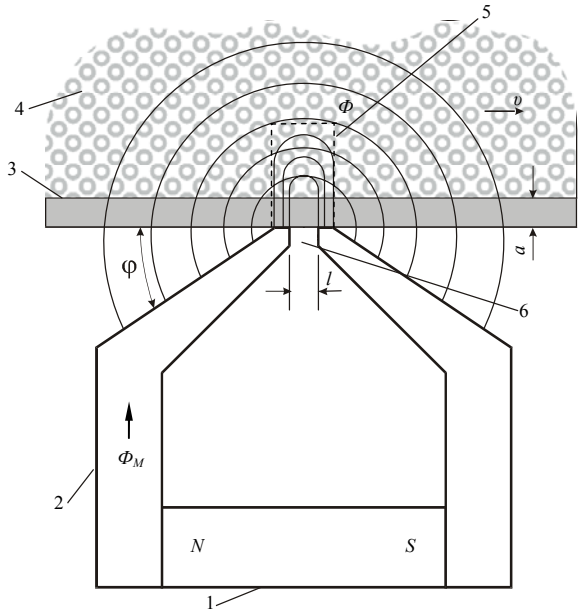


Рисунок 2. Магнітна система з постійними магнітами:
1 – постійний магніт; 2 – полюсний наконечник;
3 – немагнітна і електроізолююча прокладка;
4 - рухомий подрібнений матеріал з магнетитовими включеннями; 5 – нерухомий контрольований об'єм у якому змінюється магнітна проникність;
6 – повітряний зазор

Магнітна проникність матеріалу в нерухомому контрольованому об'ємі залежить від об'ємного вмісту в ньому феромагнітної складової – магнетиту і може бути визначеною відповідно виразу

$$\mu_{Ko} \cong k_\mu Fe_M(\%) V_T, \qquad (8)$$

де k_μ – сталий коефіцієнт; Fe_M – вміст магнітного заліза в твердому.

Магнітний потік в магнітопроводі, що проходить через нерухомий контрольований об'єм, дорівнює

$$\Phi_M = \int_S H_П \mu_{Ko} dS, \qquad (9)$$

де S – поперечний переріз контрольованого об'єму.

Підставивши значення $H_П$, μ_{Ko} і $dS=b_H dX$ в рівняння (9) і перетворивши його, отримаємо

$$\Phi_M = -k_\mu b_H H_3 \left(\frac{K_1}{C_1} e^{-C_1 a} + \frac{K_2}{C_2} e^{-C_2 a} \right) Fe_M(\%) V_T. \qquad (10)$$

Враховуючи для певної конструкції магнітної системи незмінність параметрів, формулу (10) можливо подати у вигляді

$$\Phi_M = -K_\Phi Fe_M(\%)V_T\,, \qquad (11)$$

де $K_\Phi = k_\mu b_H H_3\left(\frac{K_1}{C_1}e^{-C_1 a} + \frac{K_2}{C_2}e^{-C_2 a}\right)$.

Значно вагоміший ефект порівняно з перетворювачем Холла можливо отримати, використавши індукційну обмотку, в якій при зміні магнітного потоку Φ_M буде індукуватись електрорушійна сила (е.р.с.). При цьому перетворювач стає генератором напруги, струм якого створює власне магнітне поле, яке чинить розмагнічіючий вплив на постійний магніт. В наслідок цього в процесі експлуатації спостерігається зниження напруженості поля в зазорі, а як наслідок, і вихідного сигналу перетворювача. Це явище виключають використанням стабілізованих постійних магнітів. Постійний магніт буде достатньо стабілізованим, якщо його повністю намагнітити до введення в магнітний ланцюг.

Е.р.с., що індукується у вимірювальній обмотці, дорівнює

$$E = -w\frac{d\Phi_M}{dt}\,, \qquad (12)$$

де w – число витків у вимірювальній обмотці; Φ_M – частина магнітного потоку, що проходить через нерухомий контрольований об'єм.

Підставивши значення Φ_M (11) в (12) і виконавши перетворення, отримаємо вираз для миттєвих значень е.р.с.

$$E = -wK_\Phi Fe_M(\%)\frac{dV_T}{dt}\,, \qquad (13)$$

З врахуванням (5) миттєве значення е.р.с., що індукується в обмотці, буде дорівнювати

$$E = -wK_\Phi Fe_M(\%)\frac{\upsilon}{k_1 k_2}\sqrt{\frac{\pi d^3 V_T}{12}\left(2k_2^2 + k_1^2\right)}\,. \qquad (14)$$

Дана залежність порівняно з (10) забезпечує набагато вищу чутливість, оскільки число витків в обмотці може бути значним. Звичайно обмотку перетворювача виконують у вигляді двох секцій розміщених на прямих ділянках полюсних наконечників 2 (рис.2). Кожна секція вимірювальної обмотки може містити до w_1=w_2=12500 в, w=25000 в.

З залежності (14) видно, що за е.р.с. E, яка індукується в вимірювальній обмотці, можливо визначати крупність піскового продукту d, оскільки всі конструктивні і фізичні параметри перетворювача – w, K_Φ, k_1, k_2, технологічний параметр V_T – математичне сподівання вмісту твердого в контрольованому об'ємі є незмінними величинами, а швидкість потоку υ і вміст магнетиту в твердому $Fe(\%)$ можливо стабілізувати або врахувати. Однак у даному перетворювачі є певні особливості, які слід розглянути.

Е.р.с. (14) може залежати від довжини повітряного зазора (рис.2), який не входить до формули (14). Цей параметр враховується, але не прямо, а через відповідний параметр нерухомого контрольованого об'єму 5 (рис.2), а саме довжину його вздовж переміщення матеріального потоку. Встановити вплив довжини повітряного зазора l на довжину параметра контрольованого об'єму, який зайнято магнітним полем можливо лише експериментально. Експериментальними дослідженнями даної магнітної системи отримані залежності, приведені на рис.3. З залежностей видно, що довжина повітряного зазора l сильно впливає на H при малих відстанях X від нього. Якщо немагнітна і електроізолююча прокладка 3 (рис.2) буде мати товщину a=3 мм, то експериментальні залежності за її межами не сильно відрізняються між собою. І все ж таки найбільша рівномірність напруженості в контрольованому об'ємі буде при l = 5,5 мм. Тому приймемо довжину повітряного проміжку l в магнітній системі на рівні l = 5 мм. При цьому магнітне поле в нерухомому об'ємі буде рівномірним, розповсюджуючись у матеріальний потік до 20 мм. Він буде зберігати практично незмінне значення напруженості. Вздовж потоку магнітне поле розповсюджується на незначну величину, яка наближено складає 5 мм. При вибраному значенні l = 5 мм на вихідний сигнал не будуть впливати можливі зміни розмірів зазора при коливаннях температури навколишнього середовища, оскільки зберігаються першопочаткові розміри і форма магнітного поля, що створює нерухомий контрольований об'єм.

Крім того, е.р.с. E лінійно зростає при збільшенні ширини полюсних наконечників b_H, що слідує з формули (11). Однак при подальшому зростанні ширини полюсних наконечників поступово буде втрачатись чутливість δ даного процесу. При цьому е.р.с нелінійно повинна зменшуватись, переходячи через максимум, зменшуючи і коливальність. При певній ширині полюсних наконечників b_H випадковий процес взагалі припинить своє існування. Тому найкраще вибрати ширину полюсних наконечників b_H, що входить в (14) через коефіцієнт K_Φ, при якій спостерігається максимум е.р.с., однак теоретично це зробити не можливо.

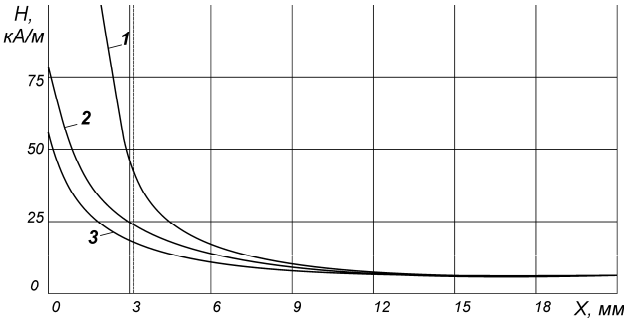


Рисунок 3. Залежність напруженості магнітного поля H від віддалення вздовж нормалі до зазора від крайки полюсних наконечників при різних значеннях l:

1 – l = 1,5 мм; 2 – l = 3 мм; 3 – l = 5,5 мм

Визначення оптимальної ширини полюсних наконечників магнітної системи з оптимізованими її іншими параметрами виконувалося в процесі експе-

риментальних досліджень. Для дослідження залежності вихідного сигналу перетворювача від ширини полюсних наконечників було виготовлено пристрій з лінійним повітряним зазором l = 5 мм і шириною наконечників b_H=100 мм. Перетворювач монтувався знизу в прямокутному отворі в нахиленій стальній плиті, футерованій зверху резиною товщиною 3 мм. Тобто, в просторі над листом резини створюється контрольований нерухомий об'єм з визначеними розмірами і формою. Зверху на сталевій плиті встановлювався відкритий знизу канал прямокутного поперечного перерізу з можливістю переміщення його вздовж ширини полюсних наконечників і герметизації ліній зіткнення з основою для виключення протікання рідини. Канал у верхній частині з'єднувався з пульпоакумулюючою ємкістю, в яку подавалися піски механічного односпірального класифікатора. Незмінний нахил стальної плити і густини пісків забезпечували постійність швидкості руху матеріалу в механічному полі перетворювача.

Переміщенням прямокутного канала на стальній нахиленій плиті встановлювали необхідну частину полюсних наконечників магнітної системи під матеріальний потік. Інша частка полюсних наконечників знаходилася поза каналом і не взаємодіяла з матеріальним потоком. При незмінних параметрах матеріального потоку вихідний сигнал перетворювача повинен залежати лише від ширини полюсних наконечників. Враховуючи те, що вологість пісків механічного односпірального класифікатора практично незмінна і незмінним є нахил стальної плити з перетворювачем, швидкість потоку не контролювалася і вважалася постійною. Незмінними вважалися і крупність пісків та вміст магнітного заліза в твердому, оскільки експерименти проводились неперервно в одній робочій точці технологічного процесу. В процесі досліджень проведено 25 експериментів.

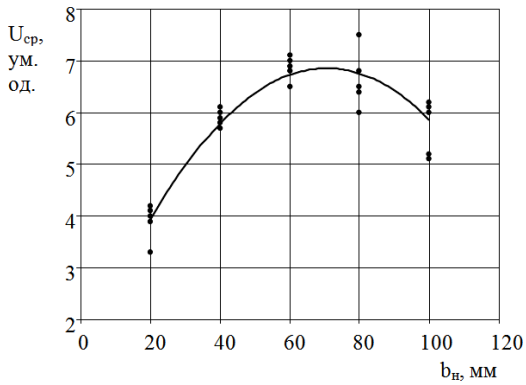
Сигнал датчика підсилювався і заносився в пам'ять комп'ютера впродовж 10 с, після чого оброблявся з визначенням середнього значення і числа позитивних викидів випадкового процесу за нульовий рівень. Залежності, отриманні в експериментальних дослідженнях, приведені на рис.4. В процесі комп'ютерної обробки експериментальних даних отримані залежності

$$U_{cp} = -0.0011b_H^2 + 0.1611b_H + 1.18, \qquad (15)$$

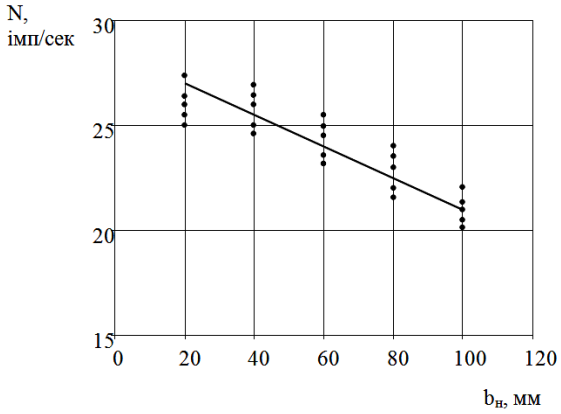
$$N = -0.075b_H + 28.5, \qquad (16)$$

де U_{cp} – середнє значення амплітуди перетворювача, в умовних одиницях; N – частота викидів (Райсова частота) сигналу за нульовий рівень.

Отримані за рівняннями (15) і (16) графіки залежностей також нанесені на рис.4. Аналіз результатів досліджень показує, що залежність $U_{cp} = f(b_H)$ є нелінійною і має максимум при b_H = 70 мм. Частота викидів N, згідно рівнянню (16) змінюється незначно при зміні b_H. Максимальне значення амплітуди вихідного сигналу перетворювача можливо отримати при b_H =60…80 мм. Частота викидів при цьому зменшується незначно. Приймемо менше значення ширини полюсних наконечників, тобто, b_H =60 мм.



а



б

Рисунок 4. Графіки залежності амплітуди U_{cp} (а) і частоти N (б) викидів вихідного сигналу перетворювача від ширини $b_н$ полюсних наконечників

Магнітоелектрична система з оптимальними конструктивними параметрами створює в матеріальному потоці контрольований об'єм 5×20×60 мм = 6000 мм^3. Якщо частки твердого представлені сферами одного розміру, то коефіцієнт розпушення матеріалу дорівнює 1,3514, що відповідає об'єму твердого V_T = 4439,84 мм^3. При розмірі часток пісків d = 2,5 мм в контрольованому об'ємі одночасно буде знаходитись два елементарних об'єма ΔV з 272 частками в кожному. Моделюванням, методика якого описана в [21], можливо прослідкувати характер зміни сферичних часток твердого в контрольованому об'ємі. Реально піски представлені рядом класів крупності. Тоді відхилення будуть відбуватися у кожному класі, що відповідатиме середньозваженій крупності.

Зважаючи на те, що вміст магнітного заліза в твердому може змінюватись в достатньо широких межах, його необхідно враховувати. Для цього в кінці нахиленої частини одного з полюсних наконечників (рис.2) в центральній частині виконувався повний проріз, куди встановлювався перетворювач Холла. Сигнал перетворювача Холла буде пропорційним вмі-

сту магнітного заліза. Якщо взяти певне базове значення вмісту магнітного заліза в пісках, то виміряний сигнал індукційної обмотки, який залежить від крупності твердого, необхідно змінити в залежності від відхилення поточного значення вмісту магнітного заліза від базового. Дану операцію найкраще здійснювати в цифровому вигляді.

Магнітоелектрична система з обґрунтованими оптимальними параметрами експериментально досліджувалася на пісковому матеріалі. Для цього були заготовлені піски з різними середньозваженою крупністю і вмістом магнітного заліза в межах їх зміни в технологічному процесі. Дослідження проводилося на стенді, де на горизонтальній площині встановлювалася вертикальна стінка з плексигласу товщиною 5 мм. Між нею і такою ж металевою стінкою, встановленою на відстані 100 мм, засипався пісковий матеріал з вмістом вологи 12%, який ущільнювався згідно умовам транспортування в односпіральному класифікаторі. Вздовж стінки на направляючих з забезпеченням притиснення рухалася нормально розташована до неї зазором магнітоелектрична система під дією привода, що розвивав незмінну поступальну швидкість переміщення 0,44 м/с. Сигнали перетворювачів заносились в пам'ять персонального комп'ютера після встановлення усталеної швидкості руху. В процесі обробки отримували середнє значення підсилених напруг індукційної обмотки і перетворювача Холла. За базове значення сигналу перетворювача Холла було прийняте мінімальне в експериментах. Всі інші – більші значення при обробці матеріалів ділилися на мінімальне. Сигнал індукційної обмотки перемножувався з величиною відношення сигналів перетворювача Холла. Таким чином отримували результуюче значення вихідної величини U_{cp} (ум.од.) магнітоелектричної системи. В експериментах середньозважена крупність пісків змінювалася в межах 1,45…2,61 мм. Вміст магнітного заліза не вимірювався, лише було відомо, що в матеріалі він змінювався на 19%. Результати експериментів нанесені на рис.5, з якого видно, що вихідний сигнал магнітоелектричної системи зростає при збільшенні середньозваженої крупності пісків. Кореляційний зв'язок достатньо тісний. Експериментальна залежність за характером відповідає теоретичній, що гарантує вимірювання крупності піскового продукту односпірального класифікатора даною магнітоелектричною системою.

Для вимірювання середньозваженої крупності пісків необхідно забезпечити незмінність їх переміщення відносно магнітоелектричної системи. В односпіральному класифікаторі такою точкою може бути робочий елемент спіралі, який при трьох її обертах за хвилину рухається з лінійною швидкістю 0,44 м/с. Для цього необхідно виготовити за формою робочого елемента спеціальну вставку, на якій розмістити магнітоелектричну систему, виконану у формі датчика крупності пісків.

Обмотка датчика крупності пісків з великою кількістю витків в умовах високої вологості потребує контролю ізоляції. Для цього існує метод врахування експлуатаційних факторів [26], але його тут застосувати неможливо. Неможливо також реалізувати і відомий метод вимірювання тангенса кута діелектричних втрат і «розрядної активності» [27]. Дану задачу можливо вирішити подачею невеликої напруги змінного струму частотою 50 Гц на додаткову обмотку 400 витками і вимірюванням частки індукованої напруги на робочій обмотці зі зміною коефіцієнта підсилення вимірюваного каналу до отримання нормативного значення сигналу при зміні опору обмотки внаслідок впливу вологи.

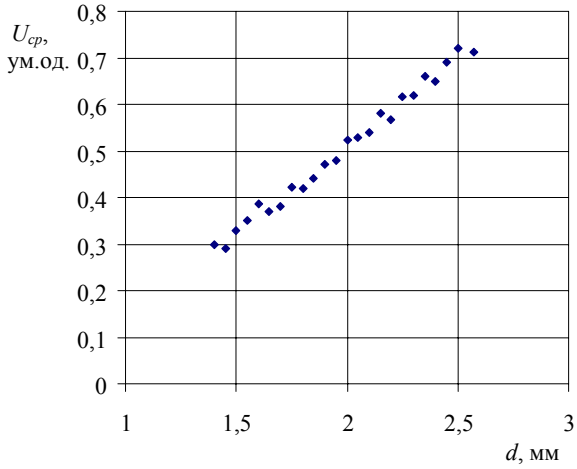


Рисунок 5 – Експериментально отримана залежність вихідного сигналу магнітоелектричної системи від середньозваженої крупності піскового матеріалу

V. ВИСНОВКИ

У роботі вирішене актуальне завдання створення магнітоелектричної системи, здатної контролювати середньозважену крупність пісків механічного односпірального класифікатора і забезпечити цим самим неухильне зростання енергоефективності подрібнення руди в першій стадії та зменшення собівартості вітчизняного концентрату залізної руди. При цьому вперше отримана математична залежність швидкості зміни об'ємного вмісту твердого, що є випадковим процесом, у невеликому за розміром контрольованому об'ємі простору, через який рухається пісковий продукт, від середньозваженого розміру пісків в умовах незмінності об'єму твердого в контрольованому об'ємі та швидкості руху потоку. Вперше введено поняття чутливості випадкового процесу до кількості часток певного середньозваженого розміру твердого у контрольованому об'ємі, що дало можливість обмеження верхньої границі показника до 1000 штук і вибору величини контрольованого об'єму. Доведено, що швидкість зміни вмісту твердого в контрольованому об'ємі доцільно визначати за допомогою магнітоелектричної системи, яка удосконалена і містить постійний магніт, два полюсних наконечники з повітряним проміжком між ними, індукційну обмотку з числом витків до 25000 і перетворювач Холла, встановлений у наскрізній прорізі одного з полюсних наконечників. При товщині немагнітної струмонепровідної прокладки 5 мм вона створює контрольований об'єм у вигляді

магнітного поля практично незмінної напруженості розміром близько 5×20×60 мм завдяки нахилу полюсних наконечників під кутом 45° до потоку та виконаною їх товщиною 2 мм біля повітряного проміжку довжиною 5 мм з наступним розширенням до 10 мм біля джерела магніторушійної сили та шириною 60 мм.

Доведено, що в контрольованому об'ємі при прийнятих його розмірах зі зменшенням крупності пісків відхилення об'єму твердого від середнього значення також зменшується, створюючи похибку вимірювання, однак впродовж циклу осереднення ця похибка ліквідується і результат вимірювання відповідає осередненому вмісту твердого. При зміні вмісту магнітного заліза в пісках виникає похибка вимірювання середньозваженої крупності, яка компенсується перемноженням е.р.с. індукційної обмотки на відношення сигналів перетворювача Холла при поточному і мінімальному вмісті магнітного заліза в твердому.

В процесі експериментальних досліджень встановлено, що розроблена магнітоелектрична система здатна визначати середньозважену крупність пісків, оскільки її вихідний сигнал зростає при збільшенні вимірюваної величини, кореляційний зв'язок між параметрами достатньо тісний, а отримана експериментальна залежність за характером відповідає теоретичній.

Це дозволяє на підставі даної магнітоелектричної системи, яка для пісків створена вперше, розробити засіб вимірювання середньозваженої крупності піскового продукту у промислових умовах та шляхом автоматизації вплинути на зменшення собівартості залізорудного концентрату.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

[1]. Троп А. Е. Автоматизация обогатительных фабрик / А. Е. Троп, В. З. Козин, Е. В. Прокофьев. – М.: Недра, 1987. – 303 с.

[2]. Evans C. L. Estimating error in measurements of mineral grain size distribution / C. L. Evans, T. J. Napier-Munn // Minerals Engineering. – 2013. – no. 52. – pp. 198 – 203. doi: https://doi.org/10.1016/ j.mineng.2013.09.005.

[3]. Mariano R.A. Error analysis in ore particle composition distribution measurements / R. A. Mariano, C. L. Evans // Minerals Engineering. – 2015. – no. 82. – pp. 36 – 44. doi: https://doi.org/ 10.1016/ j.mineng.2015.06.001.

[4]. Zuo W. Ore impact breakage characterisation using mixed particles in wide size range / W. Zuo, F. Shi // Minerals Engineering. – 2016. – no. 86. – pp. 96 – 103. doi: https://doi.org/10.1016/j.mineng.2015. 12.007.

[5]. Топчаев В. П. Новый поточный гранулометр ПИК-074П для автоматического контроля гранулометрического состава пульпы / В. П. Топчаев, А. В. Топчаев, М. В. Ланидус // Цветные металлы. – 2005. – №10. – С. 25 – 27.

[6]. Марюта А. Н. Автоматизация процессов обогащения руд / Марюта А. Н., Давидкович А.С., Гуленко Т.И., Кондратец В.А. К.:Техніка, 1972. – 140 с.

[7]. Корнилин Д.В. Определение параметров дисперсной фазы датчиком встроенного контроля гидросистем на основе КМДП-матрицы / Корнилин Д.В., Кудрявцев И.А., Логвинов Л.М., Воронов А.Ф. // Приборы. – 2010. – №5. – С. 35 – 41.

[8]. Zapata-Massot C. On the use of scanning electron microscopy for the modelling of co-grinding kinetics in a tumbling ball mill / C. Zapata-Massot, Ch. Frances, N. Le Bolay // Powder Technology. – 2004. – no. 143 – 144. – pp. 215-229. doi: https://doi.org/ 10.1016/ j.powtec.2004.04.016.

[9]. Моркун В. С. Ультразвуковые поверхностные волны Лэмба и Лява в измерительных системах / В. С. Моркун, О. В. Поркуян. – Кривой Рог: КТУ, 2006. – 261 с.

[10]. Конгас М. Новое поколение анализаторов размера частиц в пульпе / М. Конгас, К. Салохеймо // Цветные металлы. – 2010. – №2. – С. 82 – 88.

[11]. Евстюгин С. Н. Применение системы "Гранулометр" для непрерывного бесконтактного определения гранулометрического состава кусковых материалов / С. Н. Евстюгин, А. В. Стародумов, В. Н. Круглов // Сталь. – 2003. – №1. – С. 36 – 38.

[12]. Francini F. Electro-optical granulometer for measurements of flowing particles / F. Francini, D. Iorio-Fili, G. Longobardi // Optics & Laser Technology. – 1982. – no.14. – iss. 2. – pp. 81 – 85. doi: https://doi.org/10.1016/0030-3992(82)90006-8.

[13]. Ponsa M.N. Particle morphology: from visualisation to measurement / Ponsa M.N., Viviera H., Belarouia K., Bernard-Michela B., Cordierb F., Oulhanab D., Doddsb J. A. // Powder Technology. – 1999. – no. 103. – iss. – 1. – pp. 44 – 57. doi: https://doi.org/ 10.1016/ S0032-5910(99)00023-6.

[14]. LabVIEW for Maschine Vision. http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/land/en/nid/10419

[15]. Система определения крупности агломерата. http://www.scma.com.ua/ Ru/Products/soka

[16]. Mwanga A. Comminution modeling using mineralogical properties of iron ores / Mwanga A., Parian M., Lamberg P., Rosenkranz J. // Minerals Engineering. – 2017. – no. 111. – pp. 182 – 197. doi: https://doi.org/10.1016/j.mineng.2017.06.017.

[17]. Гуленко Т. И. Лабораторные исследования магнитоиндукционного гранулометра / Гуленко Т. И., Кауль Б. И., Лозовой П. Г., Кондратец В. А., Гончаров Н. В., Носов Г. Р. // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 1967. – №7. – С. 157 – 163.

[18]. Гуленко Т. И. Опытная эксплуатация магнитоиндукционного гранулометра / Т. И. Гуленко, А. Ф. Лепеха, Ю. А. Княжицкий // Горный журнал. – 1968. – №9. – С. 51 – 53.

[19]. Кондратец В. А. Измерение расхода ферромагнитной пульпы / В. А. Кондратец, Т. И. Гуленко // Измерительная техника. – 1971. – №10. – С. 91 – 92.

[20]. Кремлевский П. П. Расходомеры и счетчики ко-

личества / П. П. Кремлевский // Изд. 3-е, перераб. и доп. – Л.: Машиностроение (Ленингр. отд-ние), 1975. – 776 с.

[21]. Кондратець В. О. Дослідження випадкового процесу навантаження опорного ролика конвеєра в умовах осередненого потоку руди / В. О. Кондратець // Зб. наук. праць Національного гірничого університету.- Дніпропетровськ: Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет». – 2013. – №43. – С.79 – 88.

[22]. Ржевский В. В. Основы физики горных пород / В. В. Ржевский, Г. Я. Новик. – М.: Книжный дом "Либроком", 2010. – 360 с.

[23]. Вейнберг А. К. Магнитная проницаемость, электропроводность, диэлектрическая проницаемость и теплопроводность среды, содержащей сферические и эллипсоидальные включения / А. К. Вейнберг. [Изучение горных пород]. Доклады АН СССР. – т. 169. – №3. – 1966. – С. 543 – 546.

[24]. Власов А. Я. Магнитная анизотропия осадочных пород / А. Я. Власов, Г. В. Коваленко. – "Известия АН СССР". Серия геофизическая. – 1964. – №12. – С. 1789 – 1800.

[25]. Нагата Т. Магнетизм горных пород / Т. Нагата. – М.: Мир, 1965. – 348 с.

[26]. Спица А. Г. Эксплуатационные факторы, влияющие на работу систем непрерывного контроля изоляции трансформаторного оборудования / А. Г. Спица // Електротехніка та електроенергетика. – 2013. – №1. – С. 41 – 47.

[27]. Андриенко П. Д. Особенности мониторинга технического состояния основной изоляции высоковольтных вводов и трансформаторов тока / П. Д. Андриенко, А. А. Сахно, С. П. Конограй, А. Г. Спица, Л. С. Скрупская // Електротехніка та електроенергетика. – 2014. – №1. – С. 43 – 48.

Стаття надійшла до редакції 20.12.2017

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ, КОТОРАЯ ВОСПРИНИМАЕТ КРУПНОСТЬ ПЕСКОВ ОДНОСПИРАЛЬНОГО КЛАССИФИКАТОРА

МАЦУЙ А. Н. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры автоматизации производственных процессов Центральноукраинского национального технического университета, Кропивницкий, Украина, *e-mail:matsuyan@mail.ru*;

КОНДРАТЕЦ В.А. д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры автоматизации производственных процессов Центральноукраинского национального технического университета, Кропивницкий, Украина, *e-mail:matsuyan@mail.ru*.

Цель работы. *Целью работы является создание магнитоэлектрической системы с постоянными магнитами, которая воспринимает крупность песков односпирального классификатора путем установления связи выходного сигнала с измеряемой величиной, избавления влияния возмущений на результат и обоснования ее параметров.*

Методы исследований. *Проведенные исследования выполнены на основании использования методов теории электротехники, магнитных систем с постоянными магнитами, гальваномагнитных преобразователей, вероятностей, случайных процессов, статистики, регрессионного анализа, чувствительности, дифференциального исчисления, магнетизма пород, определения физических свойств матричного материала при включении в него примесей с другими явно выраженными свойствами, классификации продуктов обогащения.*

Полученные результаты. *Математически описан процесс скорости изменения объема твердого в контролируемом объеме пространства, через который движется песковый материал. Определены границы величины контролируемого объема, при которых чувствительность еще будет достаточной. Получены теоретические зависимости скорости изменения объема твердого в контролируемом объеме от крупности песков при различных скоростях. Установлено, что состояние контролируемого объема наилучше оценивать магнитным методом. Разработана магнитоэлектрическая система с постоянными магнитами, которая имеет оптимальные значения параметров и индукционную обмотку, содержащую до 25000 витков, и в одном из полюсных наконечников которой в сплошном прорезе установлен преобразователь Холла. Магнитная система возле воздушного зазора создает в материале магнитное поле размерами 5×20×60 мм практически одинаковой напряженности. Э.д.с. магнитоэлектрической системы практически линейно изменяется при увеличении крупности материала. Она зависит от содержания магнитного железа в твердом, что компенсируется использованием сигнала преобразователя Холла. Корреляционная связь между индуктируемой э.д.с. и крупностью песков тесная, по характеру соответствует теоретической зависимости.*

Научная новизна. *Магнитоэлектрическая система для контроля средневзвешенной крупности песков односпирального классификатора создана впервые и позволяет решить актуальную задачу автоматизации первых стадий измельчения руды. Впервые получена математическая зависимость между скоростью изменения*

объема твердого в контролируемом объеме потока и крупностью песков, которая положена в основу создания магнитоэлектрической системы. Усовершенствовано магнитоэлектрическую систему исполнением конструктивных элементов, которые создают магнитное поле размерами 5×20×60 мм, и введением преобразователя Холла, который реагирует на содержание магнитного железа в твердом и позволяет повысить точность измерения.

Практическая ценность. *Практическая ценность работы заключается в том, что обоснована магнитоэлектрическая система, которая позволяет разработать средство измерения средневзвешенной крупности песков в промышленных условиях и путем автоматизации повлиять на уменьшение себестоимости железорудного концентрата.*

Ключевые слова: *магнитоэлектрическая система; индукционная обмотка; преобразователь Холла; пески классификатора; средневзвешенная крупность.*

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE MAGNETOELECTRIC SYSTEM, WHICH RECOGNIZES THE LARGE OF SUNS OF A SINGLE-SPIRAL CLASSIFIER

MATSUI A. N. Ph.D, associate professor, associate professor of department of automation of production processes of the Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, *e-mail: matsuyan@mail.ru;*

KONDRATETS V. A. Dr.Sc., professor, professor of department of automation of production processes of the Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, *e-mail: kondratetsva@gmail.com.*

Purpose. *The aim of the work is to create a magnetoelectric system with permanent magnets, which perceives the coarse size of the sand of a single-helix classifier, by establishing the connection of the output signal with the measured quantity, eliminating the effect of disturbances on the result and justifying its parameters.*

Methodology. *The studies carried out on the basis of the use of methods of the theory of electrical engineering, magnetic systems with permanent magnets, galvanomagnetic transducers, probabilities, random processes, statistics, regression analysis, sensitivity, differential calculus, rock magnetism, determination of the physical properties of matrix material when impurities are added to it with others explicitly expressed properties, the classification of enrichment products.*

Findings. *The process of the rate of change of the volume of solid in a controlled volume of space through which the sand material moves is described mathematically. The limits of the volume of the controlled volume at which the sensitivity is still sufficient are determined. The theoretical dependences of the rate of change of the solid volume in the controlled volume on the size of the sands at different speeds are obtained. It is established that the state of the controlled volume is best estimated by the magnetic method. A magnetoelectric system with permanent magnets has been developed, which has optimal parameter values and an induction winding containing up to 25,000 turns, and in one of the pole pieces of which a Hall transducer is installed in a continuous slot. The magnetic system near the air gap creates in the material a magnetic field 5 × 20 × 60 mm in size with almost the same intensity. Ed. The magnetoelectric system practically changes linearly with the increase in the size of the material. It depends on the content of magnetic iron in the solid, which is compensated by the use of the signal from the Hall converter. Correlation connection between the induced emf. and the size of the sand is close, in character corresponds to the theoretical dependence.*

Originality. *The magnetoelectric system for controlling the weighted average size of the sands of a single-helix classifier was created for the first time and allows to solve the actual problem of automation of the first stages of ore crushing. For the first time, a mathematical relationship between the rate of change in the volume of solid in the controlled volume of the flow and the size of the sands, which is the basis for the creation of a magnetoelectric system, is obtained. The magnetoelectric system is improved by the execution of structural elements that create a magnetic field of 5 × 20 × 60 mm in size and the introduction of a Hall converter that reacts to the content of magnetic iron in a solid and allows to increase the accuracy of the measurement.*

Practical value. *The practical value of the work lies in the fact that the magnetoelectric system is grounded, which makes it possible to develop a means of measuring the weighted average size of sands in industrial conditions and by automating to affect the reduction of the cost of iron ore concentrate.*

Keywords: *magnetoelectric system; induction winding; Hall converter; classifier sands; weighted average particle size.*

REFERENCES

[1]. Trop, A. E., Kozin, V. Z., Prokof'ev, E. V. (1987). Avtomatizatsiya obogatitel'nykh fabric. M. Nedra, 303.

[2]. Evans, C. L., Napier-Munn, T. J. (2013). Estimating error in measurements of mineral grain size distribution. Minerals Engineering, 52, 198-203. doi: https://doi.org/10.1016/ j.mineng.2013.09.005.

[3]. Mariano, R.A., Evans, C. L. (2015). Error analysis in ore particle composition distribution measurements. Minerals Engineering, 82, 36-44. doi: https://doi.org/ 10.1016/ j.mineng.2015.06.001.

[4]. Zuo, W., Shi, F. (2016). Ore impact breakage characterisation using mixed particles in wide size range. Minerals Engineering, 86, 96-103. doi: https://doi.org/10.1016/j.mineng.2015. 12.007.

[5]. Topchaev, V. P., Topchaev, A. V., Lanidus, M. V. (2005). Novyi potochnyi granulometr PIK-074P dlya avtomaticheskogo kontrolya granulometricheskogo sostava pul'py [New flow granulometer PIK-074P for automatic control of granulometric composition of pulp]. Tsvetnye metally, 10, 25 – 27. (in Russian).

[6]. Maryuta, A. N., Davidkovich, A. S., Gulenko, T. I., Kondratets, V. A. (1972) Avtomatizatsiya protsessov obogashcheniya rud. K. Tekhnika, 140.

[7]. Kornilin, D.V., Kudryavtsev, I.A., Logvinov, L.M., Voronov, A.F. (2010). Opredelenie parametrov dispers-noi fazy datchikom vstroennogo kontrolya gidro-sistem na osnove KMDP-matritsy [Determination of the parameters of the dispersed phase of the sensor of integrated hydraulic system monitoring based on the CMDD matrix]. Pribory, 5, 35 – 41. (in Russian).

[8]. Zapata-Massot, C., Frances, Ch., Le Bolay, N. (2004). On the use of scanning electron microscopy for the modelling of co-grinding kinetics in a tumbling ball mill. Powder Technology, 143-144, 215-229. doi: https://doi.org/10.1016/j.powtec. 2004.04.016.

[9]. Morkun, V. S., Porkuyan, O. V. (2006). Ul'trazvukovye poverkhnostnye volny Lemba i Lyava v izmeritel'nykh sistemakh. Krivoi Rog. KTU, 261.

[10]. Kongas, M., Salokheimo, K. (2010). Novoe pokolenie analizatorov razmera chastits v pul'pe [A new generation of particle size analyzers in pulp]. Tsvetnye metally, 2, 82 – 88. (in Russian).

[11]. Evstyugin, S. N., Starodumov, A. V., Kruglov, V. N. (2003). Primenenie sistemy "Granulometr" dlya nepreryvnogo beskontaktnogo opredeleniya granulometricheskogo sostava kuskovykh materialov [Application of the "Granulometer" system for continuous non-contact determination of the granulometric composition of lump materials]. Stal', 1, 36 – 38. (in Russian).

[12]. Francini, F., Iorio-Fili, D., Longobardi, G. (1982). Electro-optical granulometer for measurements of flowing particles. Optics & Laser Technology, 14, 2, 81-85. doi: https://doi.org/10.1016/0030-3992(82) 90006-8.

[13]. Ponsa, M.N., Viviera, H., Belarouia, K., Bernard-Michela, B., Cordierb, F., Oulhanab, D., Doddsb, J. A. (1999). Particle morphology: from visualisation to measurement. Powder Technology, 103, 1, 44-57. doi: https://doi.org/ 10.1016/S0032-5910(99)00023-6.

[14]. LabVIEW for Maschine Vision. http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/land/en/nid/10419

[15]. Sistema opredeleniya krupnosti aglomerata. http://www.scma.com.ua/ Ru/Products/soka

[16]. Mwanga, A., Parian, M., Lamberg, P., Rosenkranz, J. (2017). Comminution modeling using mineralogical properties of iron ores. Minerals Engineering, 111, 182-197. doi: https://doi.org/10.1016/ j.mineng. 2017.06.017.

[17]. Gulenko, T. I., Kaul', B. I., Lozovoi, P. G., Kondratets, V. A., Goncharov, N. V., Nosov, G. R. (1967) Laboratornye issledovaniya magnitoinduktsionnogo granulometra [Laboratory investigations of magnetic induction granulometer]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal, 7, 157 – 163. (in Russian).

[18]. Gulenko, T. I., Lepekha, A. F., Knyazhitskii, Yu. A. (1968). Opytnaya ekspluatatsiya magnitoinduktsionnogo granulometra [Experimental operation of magnetic induction granulometer]. Gornyi zhurnal, 9, 51 – 53. (in Russian).

[19]. Kondratets, V. A., Gulenko, T. I. (1971). Izmerenie raskhoda ferromagnitnoi pul'py [Measurement of the flow rate of the ferromagnetic pulp]. Izmeritel'naya tekhnika, 10, 91 – 92. (in Russian).

[20]. Kremlevskii, P. P. (1975). Raskhodomery i schetchiki kolichestva. L. Mashinostroenie, 776.

[21]. Kondratec', V. O. (2013) Doslidzhennja vypadkovogo procesu navantazhennja opornogo rolyka konvejera v umovah oserednenogo potoku rudy [Investigation of a random load process of a conveyor support roller under conditions of averaged ore flow]. Zb. nauk. prac' Nacional'nogo girnychogo universytetu, 43, 79 – 88. (in Ukrainian).

[22]. Rzhevskij, V. V., Novik, G. Ja. (2010). Osnovy fiziki gornyh porod. M. Librokom, 360.

[23]. Vejnberg, A. K. (1966). Magnitnaja pronicaemost', jelektroprovodnost', dijelektricheskaja pronicaemost' i teploprovodnost' sredy, soderzhashhej sfericheskie i jellipsoidal'nye vkljuchenija [Magnetic permeability, electrical conductivity, dielectric permeability and thermal conductivity of a medium containing spherical and ellipsoidal inclusions]. Doklady AN SSSR, 169, 3, 543 – 546. (in Russian).

[24]. Vlasov, A. Ja., Kovalenko, G. V. (1964). Magnitnaja anizotropija osadochnyh porod [Magnetic anisotropy of sedimentary rocks]. Izvestija AN SSSR. Serija geofizicheskaja, 12, 1789 – 1800. (in Russian).

[25]. Nagata, T. (1965). Magnetizm gornyh porod. M. Mir, 348.

[26]. Spica, A. (2013). Jekspluatacionnye faktory, vlijajushhie na rabotu sistem nepreryvnogo kontrolja izoljacii transformatornogo oborudovanija [Operational factors affecting the performance of continuous monitoring system of transformer equipment insulation]. Elektrotehnika ta elektroenergetika, 1, 41 – 47. (in Russian) doi: http://dx.doi.org/10.15588/ 1607-6761-2013-1-7.

[27]. Andrienko, P., Sakhno, A., Konogray, S., Spitsa, A., & Skrupskaya, L. (2014). Osobennosti monitoringa tehnicheskogo sostojanija osnovnoj izoljacii visokovol'tnyh vvodov i transformatorov toka [Characteristics of monitoring condition of main insulation of high-voltage bushings and current transformers]. Elektrotehnika ta elektroenergetika, 1, 43 – 48. (in Russian) doi: http://dx.doi.org/10.15588/1607- 6761-2014-1-7.

УДК 621.3.01:519.876.5

ЧИСЛЕННЫЙ БЕЗИТЕРАЦИОННЫЙ МЕТОД МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЯХ

ПАТАЛАХ Д.Г. аспирант кафедры теоретической и общей электротехники Запорожского национального технического университета, Украина, *e-mail: patalakh.dmytro@gmail.com*;

ТИХОВОД С.М. д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой теоретической и общей электротехники Запорожского национального технического университета, Украина, *e-mail: stikhovod@gmail.com*;

КОРНУС Т.М. ст. преподаватель кафедры электрических и электронных аппаратов Запорожского национального технического университета, Украина, *e-mail: tmkornus@gmail.com.*

Цель работы. *Разработка безытерационного метода расчета переходных электромагнитных и электромеханических процессов в асинхронных двигателях.*

Методы исследования. *Численные методы интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений, программирование.*

Полученные результаты. *Поскольку в систему уравнений, описывающих динамику асинхронного двигателя, входят произведения токов ротора и статора и произведение частоты вращения ротора и токов, то эта система нелинейная. Численное решение нелинейных дифференциальных уравнений предполагает итерационный процесс на каждом шаге интегрирования. Этот итерационный процесс может быть длительным и плохо сходящимся, что замедляет процесс расчета. Предложено усовершенствование численного метода, устраняющее итерационный процесс и сокращающее время моделирования. Усовершенствованный численный метод применен для интегрирования дифференциальных уравнений, описывающих динамику электромагнитных и электромеханических асинхронного двигателя.*

Научна новизна. *Предложено усовершенствование численного метода, позволяющее выполнять численное интегрирования дифференциальных уравнений, содержащих произведение функций, что позволяет избежать итерационного процесса на каждом шаге интегрирования и сократить время моделирования.*

Практическая ценность. *На основании предложенной методики может быть разработана универсальная программа моделирования электромеханических процессов в асинхронных двигателях, имеющая преимущество по быстродействию.*

Ключевые слова: *электромеханические процессы; асинхронные двигатели; численные методы; дифференциальные уравнения.*

I. ВВЕДЕНИЕ

Переходные электромагнитные и электромеханические процессы в электротехнических системах представляют опасность для оборудования, поэтому исследование этих процессов актуально [1]-[4]. Для машин нестандартного, специализированного исполнения и машин общепромышленного применения, у которых динамический режим в процессе эксплуатации является определяющим (частые пуски, реверсы, повторные включения), необходим учет динамических режимов на стадии проектирования [5], [6].

Моделирование переходных электродинамических и электромеханических процессов в асинхронных двигателях (АД) сводится к составлению системы уравнений состояния и ее численному решению [6]-[8]. В систему уравнений АД входят произведения токов ротора и статора и произведение частоты вращения ротора и токов, поэтому эта система нелинейная [8]-[10]. Численное решение нелинейных дифференциальных уравнений предполагает итерационный процесс на каждом шаге интегрирования [7], [8]. Этот итерационный процесс может быть длительным и плохо сходящимся, что замедляет процесс расчета [9]-[13].

II. АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Моделированию переходных электродинамических процессов в асинхронных двигателях посвящено много публикаций, например, [6]-[13]. Достаточно работ посвящено вычислению параметров моделей, например, [14]-[18].

В большинстве работ вычислительному механизму не уделяется достаточного внимания. Используются встроенные решатели в автоматизированные системы моделирования. Решатели автоматизированных комплексов моделирования, таких, как OrCAD Pspice [19] или MATLAB [20] используют традиционные методы численного интегрирования нелинейных дифференциальных уравнений с использованием итерационного процесса на каждом шаге интегрирования. Это замедляет процесс численного расчета.

III. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является разработка безытерационного метода расчета переходных электромагнитных и электромеханических процессов в асинхронных двигателях, в результате чего может быть сокращено время моделирования.

© Паталах Д.Г., Тиховод С.М., Корнус Т.М., 2017
DOI 10.15588/1607-6761-2017-2-5

IV. ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Моделирование процессов в асинхронном двигателе проведем, используя уравнения состояния для двухфазного двигателя в системе координат *dq*, вращающейся с угловой частотой вращения ротора. В статоре рассматриваются две обмотки, расположенные друг к другу под углом 90° *as* и *bs*. В роторе также рассматриваются также две обмотки *ar* и *br*. Двигатель конденсаторный, поэтому две фазы двигателя питаются от одной фазы трансформатора.

Схема замещения двухфазного АД приведена на рис. 1 [6]. На этой схеме пятый контур иллюстрирует динамику механической части двигателя – ротора. В этом контуре роль тока исполняет круговая частота вращения ротора w. Роль индуктивности исполняет эквивалентный момент инерции ротора с присоединенной нагрузкой, деленный на количество пар полюсов. Электромагнитный и тормозной моменты представлены, как источники ЭДС, а тормозное сопротивление задано резистивным элементом Rt.

Для схемы замещения двухфазного конденсаторного АД система уравнений, составленная по законам Кирхгофа, имеет вид [6]:

$$\left.\begin{aligned}
&e(t) = (L_m + L_s)\frac{di_{as}}{dt} + R_s i_{as} + L_m \frac{di_{ar}}{dt};\\
&0 = L_m \frac{di_{as}}{dt} + R_r i_{ar} + (L_m + L_r)\frac{di_{ar}}{dt} +\\
&+ wL_r i_{br} + wL_m P i_{bs};\\
&e(t) = (L_m + L_r)\frac{di_{bs}}{dt} + R_s i_{bs} + L_m \frac{di_{br}}{dt} + u_{Cp};\\
&0 = -wL_m P i_{as} - w(L_m + L_r) P i_{ar} +\\
&+ (L_m + L_r)\frac{di_{br}}{dt} + R_r i_{br} + L_m \frac{di_{bs}}{dt};\\
&C_p \frac{du_{Cp}}{dt} - i_{bs} = 0.
\end{aligned}\right\} \quad (1)$$

где $i_{as}, i_{bs}, i_{ar}, i_{br}$ – токи в обмотках статора и ротора фаз «a» и «b»; w – частота вращения ротора; *Lm* – взаимная индуктивность обмоток; *Ls*, *Lr* – индуктивности рассеяния обмоток статора и ротора; *Rs*, *Rr* – активные сопротивления обмоток статора и ротора; *e*(*t*) – ЭДС источника питания; u_{Cp} – напряжение на фазосдвигающем конденсаторе *Cp*.

К системе (1) следует присоединить уравнение динамики ротора:

$$\frac{J}{P}\frac{d}{dt}w + R_t w + M_t = ke \cdot \left[i_{bs} i_{ar} - i_{as} i_{br}\right], \quad (2)$$

где M_t – внешний момент, приложенный к валу ЭМ; R_t – тормозное сопротивление ротора; $ke = P \cdot m \cdot Lm/2$; *P* – число пар полюсов; *m* – число фаз обмотки статора; *J* – приведенный момент инерции вращающихся частей машины и связанных с ними тел.

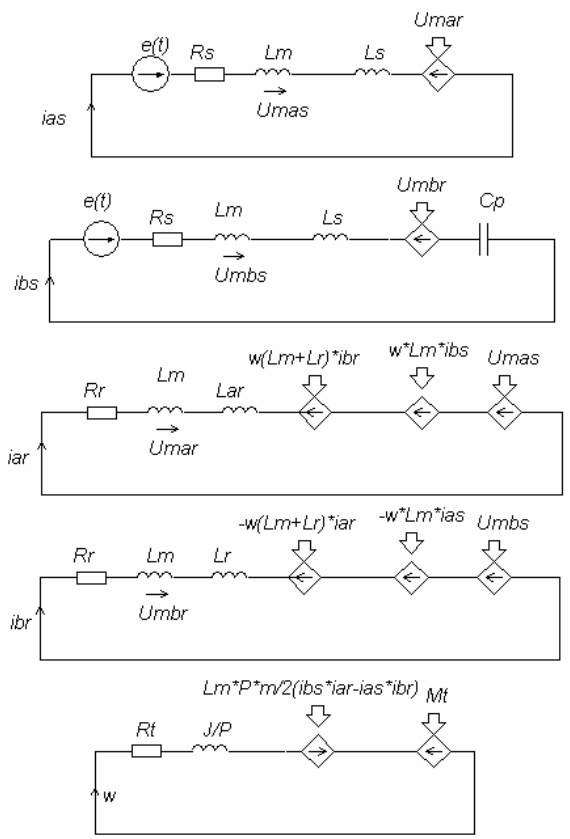


Рисунок 1. Схема замещения двухфазного АД

Систему уравнений (1,2) будем решать численным неявным методом Эйлера.

Выполним модификацию неявного метода Эйлера так, чтобы за один цикл можно было вычислить на новом (*k+1*) шаге интегрирования не только значения искомых функций, но и произведения этих функций.

Пусть в некоторое обыкновенное дифференциальное уравнение входит произведение двух функций x(t) и y(t). Тогда, согласно неявному методу Эйлера имеем:

$$(xy)_{k+1} = (xy)_k + h(xy)'_{k+1}. \quad (3)$$

В уравнении (3) преобразуем второе слагаемое правой части:

$$(xy)' = xy' + x'y. \quad (4)$$

Согласно (4) имеем:

$$\begin{aligned}(xy)'_{k+1} &= x_{k+1}y'_{k+1} + x'_{k+1}y_{k+1} =\\ &= (x_k + hx'_{k+1})y'_{k+1} + (y_k + hy'_{k+1})x'_{k+1}\end{aligned} \quad (5)$$

Учитывая выражение (5), уравнение (3) примет вид:

$$(xy)_{k+1} = (xy)_k + hy_k x'_{k+1} + hx_k y'_{k+1} + 2h^2 x'_{k+1} y'_{k+1} \quad (6)$$

Пренебрегая в (6) последним слагаемым, содержащим h^2, получим окончательно:

$$(xy)_{k+1} - hy_k x'_{k+1} - hx_k y'_{k+1} = (xy)_k. \quad (7)$$

Уравнение (7) позволяет вычислить произведение функций *x(t)* и *y(t)* на новом шаге интегрирования исходя из известных значений функций на предыдущем шаге интегрирования.

Уравнение, аналогичное (7), можно получить исходя не только из метода Эйлера, но и из какого-нибудь другого многошагового метода, например, метода Гира второго порядка:

$$x_{k+1} - \frac{2}{3}hx'_{k+1} = \frac{4}{3}x_k - \frac{1}{3}x_{k-1}$$

$$(xy)_{k+1} - \frac{2}{3}h(xy)'_{k+1} = \frac{4}{3}(xy)_k - \frac{1}{3}(xy)_{k-1}.$$

При этом точность метода повышается.

Рассмотрим вектор-столбец, содержащий следующие переменные:

$$\mathbf{X}_\mathrm{d} = [w'\ ias'\ ibs'\ iar'\ ibr'\ uc'\ w\ ias\ ibs\ iar\ ibr\ uc\ ias.ibr\ ibs.iar]^\mathrm{T}; \quad (8)$$

Система уравнений (1,2) в матричной форме приобретет вид;

$$\mathbf{M}_d \cdot \mathbf{X}_d = \mathbf{F}_d\,, \quad (9)$$

где матрица $\mathbf{M}_d$ имеет вид (10), а вектор правых частей $\mathbf{F}_d$ имеет вид (11).

Система уравнений (1,2), рассмотренная на текущем *k+1* шаге интегрирования, имеет 14 неизвестных, но содержит только 6 уравнений. Чтобы ее решить, нужно добавить уравнения численного метода Эйлера (12). Добавим также два уравнения численного метода (7) для произведения токов (13).

$$\mathbf{M}_d = \left[\begin{array}{c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c}
w' & ias' & ibs' & iar' & ibr' & uc' & w & ias & ibs & iar & ibr & uc & ias.ibr & ibs.iar \\ \hline
 & Lm+ & & Lm & & & & Rs & & & & & & \\
 & +Ls & & & & & & & & & & & & \\ \hline
 & Lm & & Lm+ & & & & & w\cdot Lm & Rr & w(Lm+ & & & \\
 & & & +Lr & & & & & & & +Lr) & & & \\ \hline
 & & Lm+ & & Lm & & & & Rs & & & 1 & & \\
 & & +Ls & & & & & & & & & & & \\ \hline
 & & Lm & & Lm+ & & & & & -w(Lm+ & Rr & & & \\
 & & & & +Lr & & & & & +Lr) & & & & \\ \hline
 & & & & & Cp & & & -1 & & & & & \\ \hline
J/P & & & & & & Rt & & & & & & ke & -ke
\end{array}\right]; \quad (10)$$

$$\mathbf{F}_d = \left[e(t)\ \vdots\ e(t)\ \vdots\ \vdots\ -M_t\right]^T \quad (11)$$

$$\left[\begin{array}{c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c}
w' & ias' & ibs' & iar' & ibr' & uc' & w & ias & ibs & iar & ibr & uc & ias.ibr & ibs.iar \\ \hline
-h & & & & & & 1 & & & & & & & \\ \hline
 & -h & & & & & & 1 & & & & & & \\ \hline
 & & -h & & & & & & 1 & & & & & \\ \hline
 & & & -h & & & & & & 1 & & & & \\ \hline
 & & & & -h & & & & & & 1 & & & \\ \hline
 & & & & & -h & & & & & & 1 & & \\
\end{array}\right] \cdot \mathbf{X}_d = \left[\begin{array}{c} w \\ \hline ias \\ \hline ibs \\ \hline iar \\ \hline ibr \\ \hline uc \end{array}\right]_k \quad (12)$$

$$\left[\begin{array}{c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c}
 & -h\cdot ibr & & & -h\cdot ibr & & & & & & & & 1 & \\ \hline
 & & -h\cdot ibr & -h\cdot ibr & & & & & & & & & & 1
\end{array}\right]_k \cdot \mathbf{X}_d = \left[\begin{array}{c} ias\cdot ibr \\ \hline ibs\cdot iar \end{array}\right]_k \quad (13)$$

Учитывая, что частота вращения ротора *w* изменяется медленно, в уравнении (9) будем использовать ее значение предыдущего шага интегрирования. Таким образом, объединенная система уравнений (9), (12), (13) содержит 14 уравнений и имеет единственное решение – вектор неизвестных (8). Таким образом, объединенная система уравнений (9), (12), (13) позволяет вычислить значения всех неизвестных токов и производных переменных состояния в текущий момент времени, если известны значения переменных состояния в момент предыдущего шага интегрирования.

Если систему уравнений (9), (12), (13) решать в цикле с пошаговым увеличением текущего времени до достижения заданного времени моделирования, то получим зависимости от времени всех токов и производных переменных состояния. Совокупность вектор-столбцов решения $\mathbf{X}_\mathrm{d}$, полученных для всех моментов времени, изменяющихся с шагом *h*, объединяется в единый массив решений **X.**

По приведенной методике разработана компьютерная программа в системе GNU Octave [19], совместимой с системой MATLAB [20], и выполнены расчеты разгона двухфазного конденсаторного двигателя мощностью 500 Вт. Временные зависимости тока статора и частоты вращения ротора приведены на рис. 2

и рис. 3. Разработана также компьютерная программа расчета разгона этого же двигателя методом Эйлера с традиционным использованием итерационных процессов на каждом шаге интегрирования.

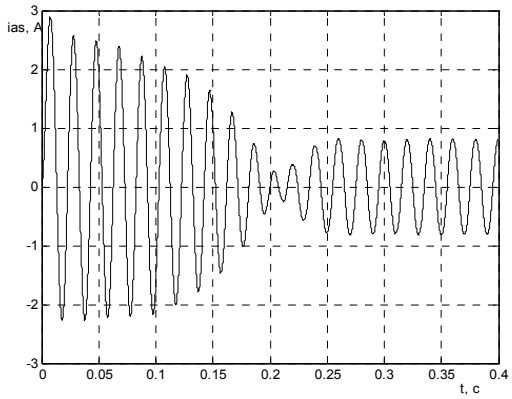


Рисунок 2. Зависимость от времени тока статора фазы «А»

Сравнение результатов расчета разными методами показало, что при одинаковой точности время расчета по предложенной методике в полтора раза сокращается.

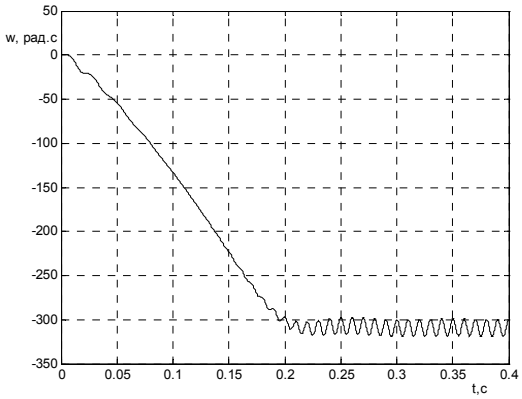


Рисунок 3. Зависимость от времени частоты вращения ротора

V. ВЫВОДЫ

Использованный метод расчета переходных электромеханических процессов в асинхронном двигателет позволяет ускорить процесс моделирования в полтора раза и сделать оптимальный выбор параметров оборудования. При этом могут быть смоделированы режимы пуска, торможения, изменения напряжения питания, сброса и наброса нагрузки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1]. Пивняк Г.Г. Переходные процессы в системах электроснабжения / Г.Г. Пивняк, В.Н. Винославский. – М.: Энергоатомиздат, Днепропетровск, Национальный горный университет, 2003. - 548 с.

[2]. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах / В.А. Веников. – М.: Высшая школа, 1985. – 536 с.

[3]. Ярымбаш Д.С. Особенности расчета токов короткого замыкания мощных электротехнических комплексов графитации переменного тока / Д. С. Ярымбаш // Електротехніка та електроенергетика. - 2012. - № 1. - С. 23-30. DOI: 10.15588/1607-6761-2012-1-6

[4]. Ярымбаш Д.С. Особенности расчета электродинамической стойкости шихтованных шинных пакетов короткой сети печи графитации / Д.С. Ярымбаш // Вісник СевНТУ: зб. наук. пр. Вип. 146/2014. Серія: Механіка. Енергетика. Екологія. – Севастополь. 2014. – С. 131 – 136.

[5]. Коцур М.И. Особенности ударного теплового воздействия на асинхронный двигатель с модифицированной системой импульсного регулирования в условиях частых пусков / И.М. Коцур // Електротехніка та електроенергетика. – 2014. - № 1. – С. 32 – 36. DOI :10.15588/1607-6761-2014-1-5

[6]. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин / И. П. Копылов. – М. : ВШ. – 2001. – 327 с.

[7]. Васьковский Ю. В. Математическое моделирование электромагнитных полей в короткозамкнутом асинхронном двигателе с поврежденной обмоткой ротора [Текст] / Ю. В. Васьковский, А. А. Гераскин // Техническая электродинамика. – 2010 – № 2. – С. 56 – 61.

[8]. Милых В. И. Анализ гармонического состава переменного магнитного поля, связанного с вращающимся ротором турбогенератора, в режиме холостого хода и короткого замыкания [Текст] / В. И. Милых, Н. В. Полякова // Электротехника и электроэнергетика. – 2013. – №2. – С. 5 – 12.

[9]. Могильников В.С. Асинхронные двигатели с двухслойным ротором и их применение [Текст] / В.С. Могильников, А.М. Олейников, А.Н. Стрельников. – М.: Энергоатомиздат, 1983. –120с.

[10]. Плюгин, В. Е. Численное моделирование электромагнитного поля асинхронного двигателя с внешним массивным ротором [Текст] / В.Е. Плюгин // Вестник НТУ «ХПИ». – 2013. – № 51 (1024) – С. 66 – 75.

[11]. Ярымбаш Д.С. Особенности определения параметров схемы замещения асинхронного двигателя для режима короткого замыкания/ Д.С. Ярымбаш, М.И. Коцур, С.Т. Ярымбаш, И.М. Коцур // Електротехніка та електроенергетика №1, 2017, с.24-30. DOI: 10.15588/1607-6761-2017-1-4.

[12]. Яримбаш Д. С. Особенности трехмерного моделирования электромагнитных полей асинхронного двигателя [Текст] / Д. С. Яримбаш, М. И. Коцур, С. Т. Яримбаш, И. М. Коцур // Електротехніка та електроенергетика – 2016. – №2 – С. 43 – 50. DOI: 10.15588/1607-6761-2016-2-5.

[13]. Пустоветов М. Компьютерное моделирование

асинхронних двигателей и трансформаторов / М. Пустоветов, К. Солус, И. Синявский.- LAP LAMBERT.- 2013.- 206 с.

[14]. Персова М.Г. О новом подходе к проектированию электрических машин на основе численного моделирования [Текст] / М.Г. Персова, Ю.Г. Соловейчик, З.С. Темлякова и др. // Электротехника. – 2007. - № 9. – С. 15 -21.

[15]. Макеев М. С. Алгоритм расчета параметров схемы замещения асинхронного двигателя по каталожным данным / М.С. Макеев, А.А. Кувшинов // Вектор науки ТГУ. – 2013. – № 1. – С. 108-112.

[16]. Мощинский Ю. А. Определение параметров схемы замещения асинхронной машины по каталожным данным [Текст] / Ю.А. Мощинский, В.Я. Беспалов, А. А. Кирякин // Электричество - 1998. - №4/98. - С. 38-42

[17]. Кеоун Д. OrCAD Pspice. Анализ электрических цепей / Дж. Кеоун. – сПб,: Питер. – 2008. – 640 с.

[18]. Ярымбаш Д.С. Особенности определения параметров электрической схемы замещения печной петли печи графитации переменного тока/ Д.С. Ярымбаш, И.М. Килимник, С.Т. Ярымбаш // Електротехніка та електроенергетика №2, 2010, С.36-43.

[19]. GNU Octave [Электронный ресурс]. – режим доступа: www.gnu.org/software/octave/index.html

[20]. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink / И.В. Черных. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.

Статья поступила в редакцию 16.12.2017

ЧИСЛОВИЙ БЕЗІТЕРАЦІЙНИЙ МЕТОД МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПРОЦЕСІВ В АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ

ПАТАЛАХ Д.Г. аспірант кафедри теоретичної та загальної електротехніки Запорізького національного технічного університету, Україна, *e-mail: patalakh.dmytro@gmail.com*;

ТИХОВОД С.М. д-р техн. наук, доцент, кафедри теоретичної та загальної електротехніки Запорізького національного технічного університету, Україна, *e-mail: stikhovod@gmail.com*;

КОРНУС Т.М. ст. викладач кафедри електричних та електронних апаратів Запорізького національного технічного університету, Україна, *e-mail: tmkornus@gmail.com*

Мета роботи. *Розробка безітераційного методу розрахунку перехідних електромагнітних і електромеханічних процесів в асинхронних двигунах.*

Методи дослідження. *Числові методи інтегрування звичайних диференціальних рівнянь, програмування.*

Отримані результати. *Оскільки в систему рівнянь, що описують динаміку асинхронного двигуна, входять добутки струмів ротора і статора і добуток частоти обертання ротора і струмів, то ця система нелінійна. Числовий розв'язок нелінійних диференціальних рівнянь передбачає ітераційний процес на кожному кроці інтегрування. Цей ітераційний процес може бути тривалим і погано збігатися, що уповільнює процес розрахунку. Запропоновано удосконалення числового методу, що усуває ітераційний процес і скорочує час моделювання. Вдосконалено числовий метод застосований для інтегрування диференціальних рівнянь, що описують динаміку асинхронного двигуна.*

Наукова новизна. *Запропоновано удосконалення числового методу, що дозволяє виконувати числове інтегрування диференціальних рівнянь, які містять добуток функцій, що дозволяє уникнути ітераційного процесу на кожному кроці інтегрування і скоротити час моделювання.*

Практична цінність. *На підставі запропонованої методики може бути розроблена універсальна програма моделювання електромеханічних процесів в асинхронних двигунах, що має перевагу по швидкодії. асинхронних двигунах, що має перевагу по швидкодії.*

Ключові слова: *електромеханічні процеси; асинхронні двигуни; числові методи; диференційне рівняння*

NUMERICAL WITHOUT ITERATION METHOD OF MODELING OF ELECTROMECHANICAL PROCESSES IN ASYNCHRONOUS ENGINES

PATALAKH D. Postgraduate student, Zaporozhye National Technical University, Zaporozhye, Ukraine, *e-mail: patalakh.dmytro@gmail.com;*

TYKHOVOD S. ScD, Assoc. Prof., Zaporozhye National Technical University, Zaporozhye, Ukraine, *e-mail: stikhovod@gmail.com;*

KORNUS T. Senior Lecture of the department of the electrical and electronic apparatus, Zaporozhye, Ukraine, *e-mail: tmkornus@gmail.com*

Purpose. *Development of calculation of electromagnetic and electromechanic transients is in asynchronous en-*

gines without iterations.

Methodology. *Numeral methods of integration of usual differential equations, programming.*

Findings. *As the system of equations, describing the dynamics of asynchronous engine, contents the products of rotor and stator currents and product of rotation frequency of rotor and currents, so this system is nonlinear one. The numeral solution of nonlinear differential equations supposes an iteration process on every step of integration. Time-continuing and badly converging iteration process may be the reason of calculation slowing. The improvement of numeral method by the way of an iteration process removing is offered. As result the modeling time is reduced. The improved numeral method is applied for integration of differential equations, describing the dynamics of asynchronous engine.*

Originality. *The improvement of numeral method allowing to execute numeral integrations of differential equations containing product of functions is offered, that allows to avoid an iteration process on every step of integration and shorten modeling time.*

Practical value. *On the basis of the offered methodology the universal program of modeling of electromechanics processes in asynchronous engines could be developed as taking advantage on fast-acting.*

Keywords: *electromechanics processes; asynchronous engines; numeral methods; differential equations.*

REFERENCES

[1]. Pivnyak G.G., Vinoslavskiy V.N. (2003). Perekhodnyye protsessy v sistemakh elektrosnabzheniya. Moscow, Energoatomizdat, 548. (in Russian)

[2]. Venikov V.A. (1985). Perekhodnyye elektromekhanicheskiye protsessy v elektricheskikh sistemakh. Moscow, Vysshaya shkola, 536. (in Russian)

[3]. Yarymbash, D. (2012). Features of the short-circuit current calculations of the ac graphitization power electrical complex. *Electrical Engineering And Power Engineering*, 1, 23-30. DOI: 10.15588/1607-6761-2012-1-6. (in Russian)

[4]. Yarymbash, D. (2014). The features of the calculation of electrodynamic stability of laminated bus packages of low-voltage circuit of graphitization furnace. *Visnyk SevNTU: Seriya: Mekhanika. Enerhetyka. Ekolohiya*. 146, 131-136. (in Russian)

[5]. Kotsur, M. (2014). Features of the of thermal effect impact on the asynchronous motor with the modified pulse control system in conditions of frequent starts. *Electrical Engineering And Power Engineering*, 1, 32-36. DOI: 10.15588/1607-6761-2014-1-5

[6]. Kopylov I.P. (2001). Matematicheskoye modelirovaniye elektricheskikh mashin. Moscow, Vysshaya shkola, 327. (in Russian)

[7]. Vaskovskiy, Yu. V., Geraskin A. A. (2012) Mathematical modeling of electromagnetic fields in the squirrel cage induction motor with damaged rotor winding, *Tehnicheskaya elektrodinamika*, 2. 56 – 61. (in Russian)

[8]. Milyih, V. I., Polyakova N. V. (2013) An analysis of harmonic composition the AC magnetic field associated with a rotating rotor turbine generator, at idle speed and short circuit modes, *Electrical Engineering And Power Engineering*, 2. 5–12. DOI: 10.15588/1607-6761-2013-2-1 (in Russian)

[9]. Mogilnikov B. C., Oleynikov A. M., Strelnikov A. N. (1983) Asinhronnyie dvigateli s dvuhsloynyim rotorom i ih primenenie, Moscow, Energoatomizdat, 120. (in Russian)

[10]. Plyugin, V. E. (2013) Numerical simulation of the electromagnetic field of the induction motor with the external massive rotor, *Vestnik NTU «KHPI»*, 51(1024), 66 – 75. (in Russian)

[11]. Yarymbash, D., Kotsur, M., Yarymbash, S., & Kotsur, I. (2017). Features of parameter determination of the induction motor substitution circuit for short-circuit mode. *Electrical Engineering And Power Engineering*, 1, 24-30. DOI: 10.15588/1607-6761-2017-1-4. (in Russian)

[12]. Yarymbash, D., Kotsur, M., Yarymbash, S., & Kotsur, I. (2016). Features of three-dimensional simulation of the electromagnetic fields of the asynchronous motors. *Electrical Engineering And Power Engineering*, 2, 43-50. DOI: 10.15588/1607-6761-2016-2-5. (in Russian)

[13]. Pustovetov M. Kompyuternoye modelirovaniye asinkhronnikh dvigateley i transformatorov / M. Pustovetov. K. Solus. I. Sinyavskiy.- LAP LAMBERT.- 2013.- 206 c. (in Russian)

[14]. Persova M. G., Soloveychik Yu. G., Temlyakova Z. S. (2007) A new approach to the design of electrical machines based on numerical simulation, Elektrotehnika, 9, 15–21. (in Russian)

[15]. Makeyev M.S., Kuvshinov A.A. (2013). Algorithm for calculating the parameters of the equivalent circuit of the asynchronous engine at the catalog data. *Vektor nauki TGU*, 1 (23), 108-112. (in Russian)

[16]. Moshchinskiy Yu.A., Bespalov V.Ya., Kiryakin A. A. (1998). Ascertainment of the equivalent circuit parameters of the asynchronous machine at the catalog data. *Elektrichestvo*, 4/98, 38-42 (in Russian)

[17]. Keoun D. (2008). OrCAD Pspice. Analiz elektricheskikh tsepey. sPb,: Piter. 640. (in Russian)

[18]. Yarymbash, S., Kylymnyk, I., & Yarymbash, D. (2010). Specific determination of equivalent circuit parameters in the furnace loop of the AC graphitizing furnace. Electrical Engineering And Power Engineering, 2, 36-43. DOI: 10.15588/1607-6761-2010-2-6. (in Russian)

[19]. GNU Octave [online] Available at: www.gnu.org/software/octave/index.html

[20]. Chernykh I.V. (2008). Modelirovaniye elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB, SimPower Systems i Simulink. Moscow, DMK Press,.288. (in Russian)

УДК 621.3.013.1

ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ТОКОВ ХОЛОСТОГО ХОДА СИЛОВЫХ ТРЕХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ С ПЛОСКИМИ СТЕРЖНЕВЫМИ МАГНИТНЫМИ СИСТЕМАМИ

ДИВЧУК Т.Е. старший преподаватель кафедры электрических машин Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина, *e-mail: DIV2009@i.ua*;

ЯРЫМБАШ Д.С. д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой электрических машин Запорожского национального университета, Запорожье, Украина, e-mail: *yarymbash@gmail.com*;

ЯРЫМБАШ С.Т. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электрических машин Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина, *e-mail: kstj06@gmail.com*;

КИЛИМНИК И.М. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры высшей математики Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина, *e-mail: dnukim76@gmail.com*;

КОЦУР М.И. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электрических и электронных аппаратов Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина, *e-mail: kotsur8@gmail.com*;

БЕЗВЕРХНЯЯ Ю.С аспирант кафедры электрических и электронных аппаратов Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина.

Цель работы. *Разработать новый эффективный подхода для определения параметров холостого хода посредством реализации комбинации схемной и пространственной математической модели нестационарных электромагнитных полей в трехфазных трансформаторах с учетом конструктивного строения активной части, нелинейности магнитных свойств электротехнических сталей, обеспечивающего высокую точность и вычислительную эффективность.*

Методы исследования. *Исследования проводились с использованием методов теории электромагнитного поля, теории электрических цепей, теории силовых трансформаторов, математической физики, метода конечных элементов, методов регрессионного и гармонического анализа.*

Полученные результаты. *Проведены теоретические исследования электромагнитных процессов на основе численной реализации трехмерной математической модели силового трехфазного трансформатора в режиме холостого хода. Предложен подход для повышения эффективности полевого моделирования режима холостого хода, который заключается в сокращении размеров расчетной области и переходу к 2D моделям. Он позволяет сократить затраты вычислительных ресурсов более, чем в 2,8 раз, временных ресурсов более, чем в 250 раз, при средневзвешенной невязке не более 3,6%. Определены закономерности распределения индукции и энергии магнитного поля для активной части трансформатора в режиме холостого хода, установлены их количественные соотношения для стержней различных фаз, определяющие соотношения токов и сопротивлений прямой и обратной последовательности трансформатора. Реализован новый подход определения параметров холостого хода трехфазных трансформаторов с плоскими стержневыми магнитными системами на базе методов схемного и 3D моделирования, гармонического анализа и симметричных составляющих. Он характеризуется высокой эффективностью численной реализации и точностью для переходных процессов включения трехфазного трансформатора без нагрузки. Установлено, что система фазных токов холостого хода характеризуется несинусоидальностью и несимметричностью. В гармоническом составе этих токов преобладают 1-я, 5-я и 7-я гармоники. На основе метода симметричных составлявших определены параметры прямой и обратной последовательности фаз первой гармоники холостого хода и предложена корректирующая методика, уточняющая традиционный инженерный подход. Использование коррекции параметров для исследованных соотношений токов прямой и обратной последовательности, повышает точность расчета токов холостого хода на 12–14% и потерь холостого хода на 9–11% по сравнению с общеизвестными инженерными методиками проектирования.*

Научна новизна. *Предложен подход для повышения эффективности полевого моделирования режима холостого хода, который заключается в сокращении размеров расчетной области и переходу к 2D моделям. Реализован новый подход определения параметров холостого хода трехфазных трансформаторов с плоскими стержневыми магнитными системами на базе методов схемного и 3D моделирования, гармонического анализа и симметричных составляющих. Он характеризуется высокой эффективностью численной реализации и точностью для переходных процессов включения трехфазного трансформатора без нагрузки.*

Практическая ценность. *Предложенные в работе подходы и методики позволяют сократить затраты*

© Дивчук Т.Е., Ярымбаш Д.С., Ярымбаш С.Т., Килимник И.М., Коцур М.И., Безверхняя Ю.С., 2017
DOI 10.15588/1607-6761-2017-2-6

вычислительных ресурсов более, чем в 2,8 раз, временных ресурсов более, чем в 250 раз, при средневзвешенной невязке не более 3,6% и повысить точность расчета токов холостого хода на 12–14% и потерь холостого хода на 9–11% по сравнению с общеизвестными инженерными методиками проектирования.

Ключевые слова: *схемная модель; трехмерное моделирование; трехфазный трансформатор; холостой ход, электромагнитное поле; метод конечных элементов; энергия магнитного поля; гармонический анализ; несинусоидальные и несимметричные токи.*

I. ВВЕДЕНИЕ

На современном этапе развития теории проектирования силовых трансформаторов ряд вопросов, связанных с особенностями их работы в переходных режимах при включении без нагрузки, с процессами электромагнитного преобразования энергии, их влияния на параметры холостого хода требует детальных исследований. Это обуславливается необходимостью поиска технических решений для повышения энергоэффективности и надежности силовых трансформаторов, который требует высокоточных расчетных моделей и методики проектирования. Также следует обеспечивать существенное сокращение затрат на разработку новых образцов, соответствующих высокому мировому уровню трансформаторного производства.

II. АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Известные инженерные методы расчета параметров холостого хода и короткого замыкания базируются на целом ряде допущений [1]-[5], что может приводить к существенным погрешностям и не удовлетворяет современным требованиям к конструкторской подготовке производства новых типов силовых трансформаторов [6]-[8]. Это характерно для трехфазных трансформаторов большой мощности со специальным конструктивным исполнением и для массовых серий распределительных силовых трансформаторов 1–3 габаритов с плоскими стержневыми магнитными системами [1], [2], [9].

Развитие новых специализированных программных комплексов расширило возможности практического использования полевых моделей и конечно-элементных методов для расчета силовых трансформаторов с учетом особенностей конструкции и динамики протекающих электромагнитных процессов, обеспечивая высокую точность проектирования [10-19]. Моделированию электромагнитных процессов, на основе схемных и полевых подходов, в практической электротехнике и электромеханике посвящен целый ряд работ [20]-[26]. Однако значительные различия геометрических размеров магнитных систем, обмоток силовых трансформаторов их катушек, слоев, ходов и витков существенно затрудняют численную реализацию пространственных полевых моделей и обуславливают значительные затраты вычислительных и временных ресурсов, в том числе, при проектировании наиболее массовых габаритов [18]-[21]. Поэтому при моделировании электромагнитных процессов в трансформаторах ограничиваются их плоскопараллельными приближениями [21,22]. Это требует определения корректных условий перехода от 3D к 2D-моделям с учетом режима работы. Точность моделирования также зависит от рассмотрения нелинейности магнитных свойств электротехнической стали, потерь от вихревых токов и гистерезиса [27], [28]. В работах [29], [30] рассмотрены подходы к учету потерь в баке трансформатора от полей рассеяния. Авторы предлагают использовать граничные условия импедансного типа [10]. Это позволяет исключить бак из вычисленной области. Такой подход может значительно снизить требования к вычислительным ресурсам. Однако точность результатов зависит от точности определения граничных условий. Использование допущений о симметрии параметров схемы замещения трехфазных трансформаторов для режима холостого хода не обеспечивает адекватных оценок при динамически протекающих процессах и приводит к достаточно высоким погрешностям расчетов [3]-[5].

Это обуславливает актуальность разработки новых подходов, расширяющих области приложения существующих методов моделирования пространственных электромагнитных полей с учетом особенностей режимов работы, конструкции трехфазной трехстержневой магнитной системы, нелинейности магнитных свойств электротехнической стали, обеспечивающих высокую точность и вычислительную эффективность.

III. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является разработка нового эффективного подхода для определения параметров холостого хода посредством реализации пространственной математической модели нестационарных электромагнитных полей в трехфазных трансформаторах с учетом конструктивного строения активной части, нелинейности магнитных свойств электротехнических сталей, обеспечивающего высокую точность и вычислительную эффективность.

IV. ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Исследования проводились для динамического режима включения силового трансформатора без нагрузки для распределительного силового трансформатора типа ТМ 1600/35 мощностью 1600 кВА, напряжение обмотки ВН 20 кВ, расчетная область которого представлена на Рис. 1. Пространственная геометрическая модель активной части силового трансформатора включает 3D области фазных обмоток НН 3 (j = 2) и ВН 3 (j = 3), главной и продольной изоляции 3 (j = 4), магнитной системы 1 (j = 1) с подобластями стержней, ярем и углов с учетом принятой схемы шихтовки магнитной системы (Рис. 1).

При математическом описании электромагнитных процессов принимаются допущения об изотропности электрофизических и электромагнитных свойств материалов, отсутствие токов смещения и свободных зарядов [24]-[26]. В этом случае нестационарные элек-

тромагнитные процессы в активной части силового трансформатора в режиме холостого хода могут быть представлены сопряженной системой нелинейных уравнений в частных производных [26]:

$$\begin{cases} \sigma_j \partial \mathbf{A}_j / \partial \tau + \sigma_j(\theta_j) \nabla V_j + \\ + \nabla \times \left[(\mu_0 \mu_j(B))^{-1} \nabla \times \mathbf{A}_j \right] = \mathbf{J}_{ej}; \end{cases} \quad (1)$$

где A – векторный магнитный потенциал; V – электрический потенциал; σ(θ) – удельная электропроводность; B – индукция магнитного поля; μ – относительная магнитная проницаемость; θ – температура; ω – угловая частота; J_e – плотность стороннего источника тока; индексы j – соответствует подобластям расчетной области (рис. 1).

В соответствии с [24], [25] система уравнений (1) дополняется условием калибровки Кулона $div(A) = 0$.

На внешних границах расчетной области задаются однородные граничные условия [25]

$$\left\{ \mathbf{A}_j = 0 \right|_{\forall j \in (1,4)}; A_j = \bar{k} \cdot A_y(x,z)|_{j=4} \quad (2)$$

и условия сопряжения в виде [25]:

$$\left\{ \mathbf{n}_{i,k} \times (\mathbf{H}_i - \mathbf{H}_k) = 0 \right|_{\forall i,k \in (1,4), i \neq k}, \quad (3)$$

где H – напряженность магнитного поля.

Трехфазный трансформатор подключается к сети с бесконечно большой мощностью и симметричной системой фазных напряжений [23].

При этом начальные условия

$$\begin{cases} u_A|_{0+} = 0; u_B|_{0+} = \sqrt{2} U_\phi \sin(2\pi/3); \\ u_c|_{0+} = \sqrt{2} U_\phi \sin(2\pi/3); \\ i_A|_{0-} = i_A|_{0+} = 0; i_B|_{0-} = i_B|_{0+} = 0; i_C|_{0-} = i_C|_{0+} = 0. \end{cases} \quad (4)$$

соответствуют первому закону коммутации [29].

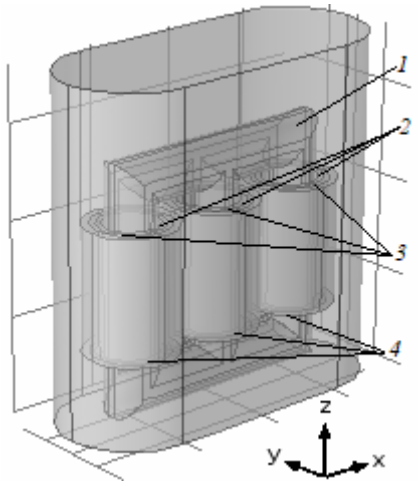
Реализация трехмерной модели (1) с условиями калибровки Кулона, граничными условиями, условиями сопряжения (2), (3) и начальными условиями (4) методом конечных элементов требует значительных временных и вычислительных ресурсов [23].

Поэтому, авторами рассматривалось допущение, что геометрическая симметрия расчетной области относительно плоскости x0z, предполагает симметрию магнитных процессов в режиме холостого хода. Это позволяет сократить расчетную область в 2 раза (Рис. 1, б). При этом на границе симметрии задаются граничные условия вида (3).

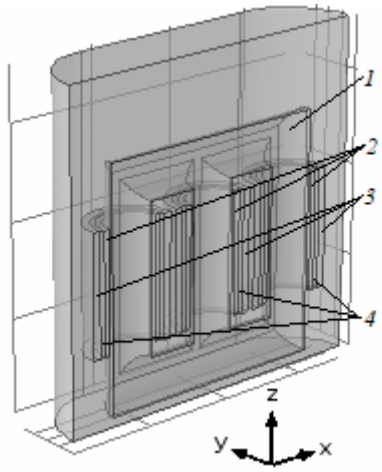
Введя допущение, что расположение обмотки по высоте стержня в режиме холостого ходу практически не влияет на величину магнитного потока [1], в соответствии с [23], можно ввести еще одно плоскость симметрии магнитных процессов.

Эта плоскость параллельна плоскости x0y и разбивает расчетную область на две симметричные части на высоте, равной половине длины стержня магнитной системы (Рис. 1, в). Это позволяет сократить расчётную область по сравнению с исходной расчетной областью (Рис. 1, а) в 4 раза. На границе симметрии задается граничное условие вида:

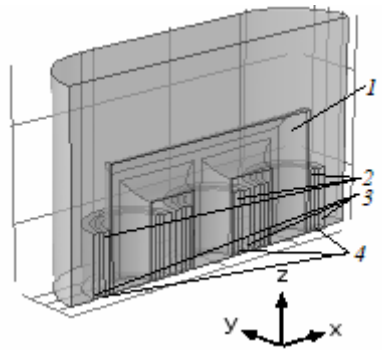
$$\left\{ H_j = 0 \right|_{\forall j \in (1,4)}; A_j = \bar{k} \cdot A_y(x,z)|_{j=4}. \quad (5)$$



а)



б)



в)

Рисунок 1. Геометрическая модель расчетной области трансформатора: а) полная; б) при оси симметрии x0z; в) при оси симметрии, параллельной оси x0

В соответствии с [23], [24], локализация магнитного поля силового трансформатора в режиме холостого хода происходит в магнитной системе. Сечение стержня и ярма магнитной системы может быть отражено кругом, с учётом соответствующих коэффициентов [1] и приведено к прямоугольной форме [20]. Это позволяет осуществить переход от трехмерной расчетной области к двухмерной и рассматривать плоскоспиральную задачу в плоскости x0z [20]:

$$\mathbf{A}_j = \mathbf{k} \cdot A_{y_j}; \mathbf{B}_j = \mathbf{i} \cdot B_{x_j} + \mathbf{j} \cdot B_{z_j}; \quad \mathbf{H}_j = \mathbf{i} \cdot H_{x_j} + \mathbf{j} \cdot H_{z_j}. \tag{6}$$

Трехмерная модель (1) и двухмерная модель (6) с условиями калибровки Кулона, граничными условиями (2), (3), (5) и начальными условиями (4), реализуется методом конечных элементов в структуре средств Comsol Multiphysics. Соотношения (1) – (6) дополняются схемной моделью на базе известной схемы замещения трансформатора в режиме холостого хода [31,32] для каждой из его фаз с учетом заданного соединения обмоток (Y или D).

Большинство специализированных программ для трехмерного моделирования имеют особенности задания магнитных свойства материалов. Тензор магнитных проницаемостей материалов может быть задан только для постоянных значений его компонент [3], [33]. Авторы предлагают объектно-ориентированный подход для задания магнитных свойств материалов. Выделяются области магнитной системы с преобладающими направлениями магнитного потока: для стержней и ярем – по направлению прокатки, прямой стык – по направлению 90 градусов к направлению прокатки, углы и косой стык – 45 градусов к направлению прокатки [22]. Такое разделение магнитной системы трансформатора позволяет достоверно учесть анизотропию свойств холоднокатаных электротехнических сталей [33]-[36].

Оценка энергии магнитного поля и ее средних значений для каждой j-й зоны расчетной области выполняется с использованием соотношений [22]:

$$W_i\big|_\tau = \frac{1}{2}\iiint\limits_{V_i} (\mathbf{B}\cdot\mathbf{H})dxdydz\big|_\tau;\ W_\Sigma\big|_\tau = \sum W_i\big|_\tau. \tag{8}$$

Точность реализации трехмерной модели (1) методом конечных элементов определялась невязкой относительной величины энергии магнитного поля для различных расчетных областей активной части силового трансформатора (табл. 1) и средневзвешенными невязками для величин энергии магнитного поля [27]:

$$\widetilde{W}_i\big|_\tau = \left|\left|W_i\big|_\tau - W_{\text{баз}}\big|_\tau\right| \Big/ \max\left(W_{\text{баз}}\right)\right| \cdot 100\%,$$

$$\widetilde{W}_{\text{ср}i}\big|_\tau = \left[\sum_{\tau=0}^{\tau=\tau_{\max}}\left|W_i\big|_\tau - W_{\text{баз}}\big|_\tau\right| \Big/ \sum_{\tau=0}^{\tau=\tau_{\max}}\left|W_{\text{баз}}\big|_\tau\right|\right] \cdot 100\%,$$

где $W_{\text{баз}}$ – величина энергии магнитного поля при реализации (1) для расчётной области (Рис. 1, а), τ – момент времени; i = 1,2,3 – для расчётных областей (Рис. 1, б, в) и двухмерной расчетной области.

При этом фиксировались затраты времени и вычислительных ресурсов (оперативной памяти) на численную реализацию модели (1) с использованием различных аппроксимирующих функций, приведенные к базовым значениям, полученным при использовании полиномов Лагранжа первой степени (табл. 1.)

Как показывает анализ полученных результатов, погрешность относительной невязки при определении величины энергии магнитного поля в расчетной области по результатам моделирования достигает 14,337…150,725 %. Максимальные значения погрешностей соответствуют начальному переходному процессу и не оказывают существенного влияния на определение параметров на установившемся участке. Таким образом, сокращение расчетной области не позволит с достаточной точностью определить токи включения холостого хода силового трансформатора [23]. Средневзвешенные невязки не превышают 0,136% и 0,155% – для расчетных областей (Рис. 1, б, в) и 3,633% – для 2D расчётной области (Табл. 1). Для установившегося участка значения средневзвешенных невязок существенно ниже, что обосновывает сокращение 3D расчетной области и применение 2D моделей для определения параметров холостого хода трансформатора. При этом, затраты вычислительных ресурсов сокращаются в 1,2…2,6 раза, а временных ресурсов – в 2,5…254 раза (Табл. 1).

Таблица 1. Погрешности реализации (1) методом конечных элементов, затраты вычислительных и временных ресурсов

Расчетная область	W		Расчетное время, о.е	Память ОЗУ, о.е.
	Относительная невязка, %	Средневзвешенная невязка, %		
3D (Рис. 1, а)	-	- / -	1	1
½ 3D (Рис. 1, б)	2,986·10-4…14,337	0,136	0,404	0,834
¼ 3D (Рис. 1, в)	1,226·10-3…22,737	0,155	0,147	0,671
2D	0,019…150,725	3,633	0,004	0,369

Точность определения параметров холостого хода по данным математического моделирования практически в два раза выше по сравнению с данными расчетов по методике [1].

Как показывает анализ полученных результатов, погрешность относительной невязки при определении величины энергии магнитного поля в расчетной области по результатам моделирования достигает

14,337…150,725 %. Максимальные значения погрешностей соответствуют начальному переходному процессу и не оказывают существенного влияния на определение параметров на установившемся участке. Таким образом, сокращение расчетной области не позволит с достаточной точностью определить токи включения холостого хода силового трансформатора [23]. Средневзвешенные невязки не превышают 0,136% и 0,155% – для расчетных областей (Рис. 1, б, в) и 3,633% – для 2D расчётной области (Табл. 1). Для установившегося участка значения средневзвешенных невязок существенно ниже, что обосновывает сокращение 3D расчетной области и применение 2D моделей для определения параметров холостого хода трансформатора. При этом, затраты вычислительных ресурсов сокращаются в 1,2…2,6 раза, а временных ресурсов – в 2,5…254 раза (Табл. 1).

Точность определения параметров холостого хода по данным математического моделирования практически в два раза выше по сравнению с данными расчетов по методике [1].

Для повышения точности гармонического анализа данных моделирования применяется успешно апробированный в работах метод кубической сплайн-интерполяцией дискретных массивов энергии магнитного поля и фазных токов [22]. Функции кубической сплайн-интерполяции фазных токов и энергии магнитного поля интерполировались рядами Фурье, что позволяет компенсировать влияние изменений временного такта при моделировании на точность обработки данных.

Для данных численного моделирования визуализируется распределение мгновенных значений индукции магнитного поля в продольном сечении магнитной системы силового трансформатора плоскостью, проходящей через оси ее стержней в момент времени $\tau = 0.4$ с (Рис. 2, а). Его характерной особенностью является локализация магнитного потока в одном из крайних стержней и прилегающих к нему ярмах. Этот фактор усиливает влияние нелинейности магнитных характеристик электротехнической стали и приводит к росту токов в обмотках фаз А и С, что отображается временными зависимостями несинусоидальной формы для нормированных фазных токов и энергии магнитного поля в активной части трансформатора (Рис. 2, б). Нормирование значений фазных токов и энергии магнитного поля для одного периода установившегося режима холостого хода выполнялось относительно максимумов соответствующих амплитуд для одного временного периода.

Анализ гармоник фазных токов и энергии магнитного поля в активной части силового трансформатора показал преобладающее влияние 1-й и 5-й гармоник для фазных токов, и нулевой 2-й и 6-й гармоник – для энергии магнитного поля.

Коэффициенты несинусоидальности токов составили 4,7 – 4,8% для фаз А, С, 3,8% и – для фазы В. Средние за временной период значения токовых погрешностей для первых гармонических составляющих фазных токов холостого хода составляют 2,987, 3,803, 2,923%, а средняя относительная погрешность для нулевой и второй гармоник энергии магнитного поля в активной части трансформатора не превышает 1,55%. Это позволяет применить метод симметричных составляющих, ограничившись первыми гармониками фазных токов, 0-й и 2-й гармониками – для энергии магнитного поля:

$$\begin{cases} I_{z(1)} = I_{A(1)} + I_{B(1)} + I_{C(1)}; \\ I_{D(1)} = I_{A(1)} + e^{j2\pi/3} \times I_{B(1)} + e^{j4\pi/3} \times I_{C(1)}; \\ I_{UnD(1)} = I_{A(1)} + e^{j4\pi/3} \times I_{B(1)} + e^{j2\pi/3} \times I_{C(1)}, \end{cases} \quad (9)$$

где $I_{z(1)}$, $I_{D(1)}$, $I_{UnD(1)}$ – амплитуды нулевой, прямой и обратной последовательности первой гармоники тока холостого хода.

Амплитуда обратной последовательности составляет 18-21% от амплитуды прямой последовательности первой гармоники тока холостого хода. Влиянием нулевой последовательности, не превышающей нескольких процентов, можно пренебречь. Это позволяет обосновать достаточно простую корректировку расчетных значений параметров холостого хода, которые определяются с использованием традиционных инженерных подходов и декомпозиции магнитной системы на ее стержни, ярма, углы и стыки [15,16,37].

На первом этапе корректируются амплитуды фазных токов холостого хода

$$\begin{cases} I_{A(1)} = I_{D(1)} + I_{UnD(1)}; \\ I_{B(1)} = I_{D(1)} \times e^{j2\pi/3} + I_{UnD(1)} \times e^{-j2\pi/3}; \\ I_{B(1)} = I_{D(1)} \times e^{-j2\pi/3} + I_{UnD(1)} \times e^{j2\pi/3}. \end{cases} \quad (10)$$

На втором этапе корректируется действующее значение тока холостого хода

$$\begin{aligned} I_{Idle} &= \left(\left|I_{A(1)}\right| + \left|I_{B(1)}\right| + \left|I_{C(1)}\right|\right) / 3\sqrt{2}; \\ i_{Idle} &= \left(I_{Idle} / I_{Ph}\right) \times 100\%, \end{aligned} \quad (11)$$

где I_{Ph} – значение номинального фазного тока трансформатора.

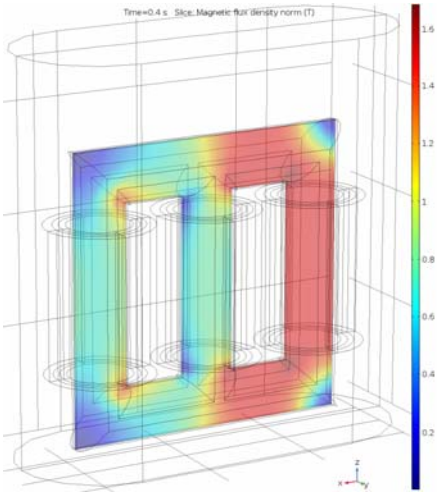
На третьем этапе корректируются расчетные значения потерь холостого хода

$$P_{Idle} = \left(i_{Idle} / i_{Idle(c)}\right)^{k_P} \times P_{Idle(c)}. \quad (12)$$

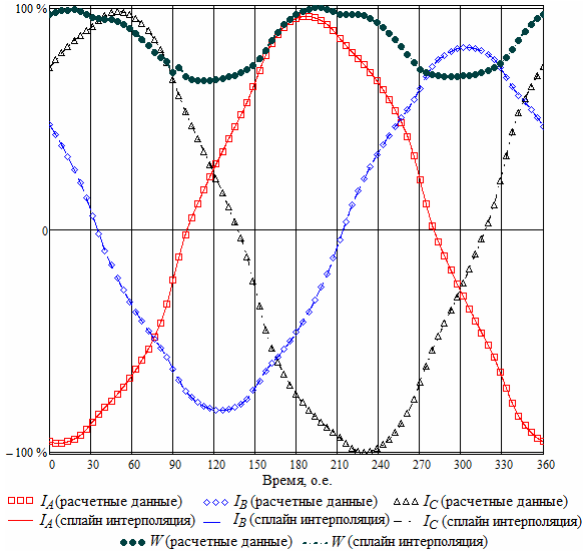
где $P_{Idle(c)}$ – рассчитанные по методике [1] потери холостого хода силового трехфазного трансформатора, k_P – коэффициент корректировки потерь холостого хода, равный 1,12 – 1,18 для трансформаторов I – III габаритов (большее значение соответствует III габариту).

Если задача 3D моделирования электромагнитных процессов в силовых трансформаторах I – III габаритов не входит в систему ограничений, которые

устанавливают взаимосвязи между векторами конструктивных параметров магнитной системы, обмоток, нелинейных свойств ферромагнитных материалов и параметрами холостого хода, то применение данного корректирующего подхода является наиболее предпочтительным.



а)



б)

Рисунок 2. Результаты расчета: а) распределение индукции магнитного поля в сечении x0z; б) фазные токи и энергия магнитного поля в активной части силового трансформатора ТМ 1600/35

В этом случае можно принять, что амплитуда обратной последовательности тока холостого хода составляет 18–20% от значения начального приближения тока холостого хода, рассчитанного по инженерной методике [1], уточнить значение тока холостого хода по соотношениям (8), (9), а потери холостого хода – с использованием выражения (10).

Сравнение данных испытаний более 19 трехфазных силовых трансформаторов I – III габаритов с расчетными параметрами холостого хода, определенными как по методике [1], так и с использованием корректирующего подхода (8)–(10), показали снижение погрешности откорректированных параметров на 12–14% для тока и 9–11% для потерь холостого хода.

V. ВЫВОДЫ

Реализован новый подход определения параметров холостого хода трехфазных трансформаторов с плоскими стержневыми магнитными системами на базе методов схемного и 3D моделирования, гармонического анализа и симметричных составляющих. Он характеризуется высокой эффективностью численной реализации и точностью для переходных процессов включения трехфазного трансформатора без нагрузки.

Предложен подход для повышения эффективности полевого моделирования режима холостого хода методом конечных элементов, который заключается в сокращении размеров расчетной области и переходу к 2D моделям. Он позволяет сократить затраты вычислительных ресурсов более, чем в 2,8 раз, временных ресурсов более, чем в 250 раз, при средневзвешенной невязке не более 3,6%. Определены закономерности распределения индукции и энергии магнитного поля для активной части трансформатора в режиме холостого хода, установлены их количественные соотношения для стержней различных фаз, определяющие соотношения токов и сопротивлений прямой и обратной последовательности трансформатора.

Установлено, что система фазных токов холостого хода характеризуется несинусоидальностью и несимметричностью. В гармоническом составе этих токов преобладают 1-я, 5-я и 7-я гармоники, но при этом доминирует первая гармоническая составляющая. На основе метода симметричных составлявших определены параметры прямой и обратной последовательности фаз первой гармоники холостого хода и предложена корректирующая методика, уточняющая традиционный инженерный подход. Использование коррекции параметров для исследованных соотношений токов прямой и обратной последовательности, повышает точность расчета токов холостого хода на 12–14% и потерь холостого хода на 9–11% по сравнению с общеизвестными инженерными методиками.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1]. Тихомиров П. М. Расчет трансформаторов [Текст] / П. М. Тихомиров. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 528 с.

[2]. Kulkarni S.V. Transformer Engineering: Design and Practice [Text] / S.V. Kulkarni, S.A. Khaparde. – New York: Marcel Dekker, 2004. – 478 p.

[3]. Придубков П. Я. Математичне моделювання електромагнітних процесів ідеального трансформатора [Текст] / П. Я. Придубков, І. В. Хоменко // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит – Харьков. – 2010. – №2.– С. 55–61.

[4]. Рогинская, Л. Э. Имитационное моделирование и экспериментальное исследование трехфазного трансформатора с витыми ленточными плоскими

и пространственными магнитопроводами [Текст] / Л. Э. Рогинская, Д. В. Гусаков // Вестник ЮУрГУ. Серия Энергетика – 2014. – Т. 14. – № 4. – С. 76–83.

[5]. Милых В. И. Анализ гармонического состава переменного магнитного поля, связанного с вращающимся ротором турбогенератора, в режиме холостого хода и короткого замыкания [Текст] / В. И. Милых, Н. В. Полякова // Электротехника и электроэнергетика. – 2013. – №2. – С. 5 – 12. DOI: 10.15588/1607-6761-2013-2-1.

[6]. Новаш И. В. Расчет параметров модели трехфазного трансформатора из библиотеки Matlab-Simulink с учетом насыщения магнитопровода [Текст] / И. В. Новаш, Ю. В. Румянцев // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ – 2015. – №1. – С. 12–24.

[7]. de Leon F. Complete Transformer Model for Electromagnetic Transients [Text] / F. de Leon, A. Semlyen // IEEE Transactions on Power Delivery – 1994. – Vol. 9. – No. 1. – P. 231–239. DOI: 10.1109/61.277694.

[8]. Majumder R. Transient Analysis of Single Phase Transformer Using State Model [Text] / R. Majumder, S. Ghosh, R. Mukherjee // International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology – 2016. – Vol. 5. – No 3, P. 3300–3306. DOI:10.15680/IJIRSET.2016.0503107.

[9]. Кислицин А.Л. Трансформаторы [Текст] / А.Л. Кислицин. – Ульяновск: УлГТУ, 2001. – 76 с.

[10]. Остренко М.В. Расчет потерь в элементах конструкции силовых трансформаторов и реакторов методом конечных элементов с граничными условиями импедансного типа [Текст] / М.В. Остренко, С.М. Тиховод // Электротехника и электроэнергетика – 2016. – №2. – С. 33–42. DOI: 10.15588/1607-6761-2016-2-4.

[11]. Тиховод С.М. Расчет переходных процессов в трансформаторах на основе магнитоэлектрических схем замещения с использованием полиномов Чебышёва [Текст] / С.М. Тиховод // Электротехника и электроэнергетика – 2015. – №2 – С. 5–14. DOI: 10.15588/1607-6761-2015-2-1.

[12]. Тиховод С.М. Усовершенствование итерационных методов решения систем нелинейных уравнений состояния магнитоэлектрических схем замещения [Текст] / С.М. Тиховод // Электротехника и электроэнергетика – 2015. – № 1. – С. 46–49. DOI: 10.15588/1607-6761-2015-1-8.

[13]. Ярымбаш Д.С. Особенности определения параметров электрической схемы замещения печной петли печи графитации переменного тока [Текст] / Д.С. Ярымбаш, И.М. Килимник, С.Т. Ярымбаш // Электротехника и электроэнергетика –2010.– № 2. – С. 36–43. DOI: 10.15588/1607-6761-2010-2-6.

[14]. Ярымбаш Д.С. Особенности электротепловых режимов главных шинных пакетов секций печей графитации переменного тока [Текст] / Д.С. Ярымбаш, И.М. Килимник, С.Т. Ярымбаш // Электротехника и электроэнергетика – 2011. – № 1. – С. 64–69. DOI: 10.15588/1607-6761-2011-1-10.

[15]. Яримбаш Д. С. Особливості визначення параметрів короткого замикання силових трансформаторів засобами польового моделювання [Текст] / Д. С. Яримбаш, С. Т. Яримбаш, Т. Є. Дівчук, І. М. Килимник // Електротехніка та електроенергетика – 2016. – № 1. – С. 12–17. DOI: 10.15588/1607-6761-2016-1-2

[16]. Яримбаш Д. С. Особливості розподілення магнітних потоків у режимі неробочого ходу силових трансформаторів [Текст] / Д. С. Яримбаш, С. Т. Яримбаш, Т. Є. Дівчук, І. М. Килимник // Електротехніка та електроенергетика – 2016. – № 2. – С. 5–12. DOI: 10.15588/1607-6761-2016-2-1.

[17]. Попов Г.В. Математическая модель динамических режимов работы трансформатора на основе расчетов магнитного поля методом конечных элементов [Текст] / Г.В. Попов, А.И. Тихонов, Д.В. Климов // Вестник ИГЭУ – 2007. – № 3. – С. 11–15.

[18]. Ketabi A. Single-phase transformer modeling for inrush currents simulation using differential evolution [Text] / A. Ketabi, M. Naseh // European Transactions on Electrical Power – 2012. – Vol. 22, Iss. 3, P. 402–411. DOI: 10.1002/etep.614.

[19]. Rashtchi V. Parameter identification of transformer detailed model based on chaos optimisation algorithm [Text] / V. Rashtchi, E. Rahimpour, E. M. Rezapour // IET Electric Power Applications – 2011. – Vol 5, No. 2. – P. 238–246. DOI: 10.1049/iet-epa.2010.0147.

[20]. Пайков И.А. Анализ моделей для электромагнитного расчета силовых трансформаторов / И.А. Пайков, А.И. Тихонов // Вестник ИГЭУ – 2015. – №3. – С. 38–43.

[21]. Jazebi S. Dual Reversible Transformer Model for the Calculation of Low-Frequency Transients [Text] / S. Jazebi, F. de León, A. Farazmand, D. Deswal // IEEE Transactions on Power Delivery – 2013. – Vol. 28, No. 4. – P. 2509–2517. DOI: 10.1109/TPWRD.2013.2268857.

[22]. Ярымбаш Д. С. Особенности определения параметров схемы замещения асинхронного двигателя для режима короткого замыкания [Текст] / Д. С. Ярымбаш, М. И. Коцур, С. Т. Ярымбаш, И. М. Коцур // Электротехника и электроэнергетика – 2017. – № 1. – С. 24-30. DOI: 10.15588/1607-6761-2017-1-4.

[23]. Подольцев А.Д. Численный расчет электрических токов, магнитного поля и электродинамических сил в силовом трансформаторе в аварийных режимах с использованием MATLAB/SIMULINK и COMSOL [Текст] / А.Д. Подольцев, Л.Н. Конторович // Техническая электродинамика – 2011. – № 6. – С. 3–10.

[24]. Ярымбаш Д.С. Исследование электромагнитных и термоэлектрических процессов в печах графитации переменного и постоянного тока [Текст] / Д.С. Ярымбаш // Вестник НГУ – 2015. – Вып. 3. – С. 95–102.

[25]. Yarymbash D. S. On specific features of modeling electromagnetic field in the connection area of side busbar packages to graphitization furnace current leads / D. S. Yarymbash, A. M. Oleinikov // Russian Electrical Engineering – 2015. – Vol. 86, Iss. 2. – P. 86–92. DOI: 10.3103/S1068371215020121

[26]. Ярымбаш Д. С. Особенности трехмерного моделирования электромагнитных полей асинхронного двигателя [Текст] / Д. С. Ярымбаш, М. И. Коцур, С. Т. Ярымбаш, И. М. Коцур // Электротехника и электроэнергетика – 2016. – № 2. – С. 43–50. DOI: 10.15588/1607-6761-2016-2-5.

[27]. Славутский А.Л. Учет остаточной намагниченности в трансформаторе при моделировании переходных процессов [Текст] / А.Л. Славутский // Вестник Чувашского университета – 2015. – №1. – С. 122–130.

[28]. Cundeva S. A Transformer Model Based on the Jiles-Atherton Theory of Ferromagnetic Hysteresis [Text] / S. Cundeva // Serbian Journal of Electrical engineering – 2008. – Vol. 5, No. 1. – P. 21–30. DOI: 10.2298/SJEE0801021C

[29]. Wagner B. Error Evaluation of Surface Impedance Boundary Conditions With Magnetic Vector Potential Formulation on a Cylindrical Test Problem [Text] / B. Wagner, W. Renhart, Ch. Magele // IEEE Trans. on Magn – 2008. – Vol. 44, No 6. – P. 734–737. DOI: 10.1109/TMAG.2007.915979

[30]. Ida N. High Order Surface Impedance Boundary Conditions with the A- Formulation [Text] / N. Ida, Y. Lemenach, T. Henneron // FACTA UNIVERSITATIS – 2011. – Vol. 24, No 2. – P. 147–155, 2011.

[31]. Лейтес Л.В. Схемы замещения многообмоточных трансформаторов [Текст] / Л.В. Лейтес, А.М. Пинцов. – М.: Энергия, 1974. – 192 с.

[32]. Лейтес Л.В. Электромагнитные расчеты трансформаторов и реакторов [Текст] / Л.В. Лейтес. – М.: Энергия, 1981. – 392 с.

[33]. Холоднокатаные электротехнические стали [Текст]: справочник / Б.В. Молотилов [и др.]; ред. Б.В. Молотилов; рец. Б.Г. Лившиц. – Москва: Металлургия, 1989. – 167 с.

[34]. Tang Q. Magnetic flux distribution in power transformer core with mitred joints [Text] / Q. Tang, Sh. Guo, Zh. Wang // Journal of Applied Physics – 2015. – Vol. 117, Iss. 17, – P. 17D522-1–17D522-4. DOI: 10.1063/1.4919119.

[35]. Strac L. Determination of electromagnetic properties of steel for prediction of stray losses in power transformers / L. Strac, D. Zarko // Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences – 2015. – V. 23. – P. 1357–1371. DOI: 10.3906/elk-1301-31.

[36]. Paoli G. Complex representation in nonlinear time harmonic eddy current problems [Text] / G. Paoli, O. Biro, G. Buchgraber // IEEE Transactions on Magnetics – 1998. – Vol. 34, No.5. – P. 2625–2628. DOI: 10.1109/20.717607.

[37]. Ярымбаш Д. С. Динамическая адаптация схемных моделей короткой сети [Текст] / Д. С. Ярымбаш, И. М. Килимник, С. Т. Ярымбаш // Электротехника и электроэнергетика – 2015. – № 2. – С. 65–70. DOI: 10.15588/1607-6761-2015-2-9.

Статья поступила в редакцию 12.12.2017

ПІДХІД ДО ВИЗНАЧЕННЯ СТРУМІВ НЕРОБОЧОГО ХОДУ СИЛОВИХ ТРИФАЗНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ З ПЛОСКИМ СТРИЖНЕВИМИ МАГНІТНИМИ СИСТЕМАМИ

ДИВЧУК Т.Є. старший викладач кафедри електричних машин Запорізького національного технічного університету, Україна, *e-mail: DIV2009@i.ua*;

ЯРИМБАШ Д.С. д-р техн. наук, доцент, завідувач кафедри електричних машин Запорізького національного технічного університету, Україна, *e-mail: yarymbash@gmail.com*;

ЯРИМБАШ С.Т. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електричних машин Запорізького національного технічного університету, Україна, *e-mail: kstj06@gmail.com*;

КИЛИМНИК І.М. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри вищої математики Запорізького національного технічного університету, Україна, *e-mail: dnukim76@gmail.com*;

КОЦУР М.І. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електричних та електронних апаратів Запорізького національного технічного університету, Україна

БЕЗВЕРХНЯ Ю.С. аспірант кафедри кафедри електричних та електронних апаратів Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна.

Мета роботи. *Розробити новий ефективний підходу для визначення параметрів неробочого ходу за допомогою реалізації комбінації схемної і просторової математичної моделі нестаціонарних електромагнітних*

полів в трифазних трансформаторах з урахуванням конструктивної будови активної частини, нелінійності магнітних властивостей електротехнічних сталей, що забезпечує високу точність і обчислювальну ефективність.

Методи дослідження. *Дослідження проводились з використанням методів теорії електромагнітного поля, теорії електричних кіл, теорії силових трансформаторів, математичної фізики, методу скінченних елементів, методів регресійного та гармонійного аналізу.*

Отримані результати. *Проведено теоретичні дослідження електромагнітних процесів на основі чисельної реалізації трьохвимірної математичної моделі силового трифазного трансформатора в режимі неробочого ходу. Запропоновано підхід для підвищення ефективності польового моделювання режиму неробочого ходу, який полягає в скороченні розмірів розрахункової області і переходу до 2D моделей. Він дозволяє скоротити витрати обчислювальних ресурсів більше, ніж в 2,8 раз, часових ресурсів більше, ніж в 250 разів, при середньозваженій нев'язці не більше 3,6%. Визначено закономірності розподілу індукції і енергії магнітного поля для активної частини трансформатора в режимі неробочого ходу, встановлені їх кількісні співвідношення для стрижнів різних фаз, що визначають співвідношення струмів і опорів прямої і зворотної послідовності трансформатора. Реалізовано новий підхід визначення параметрів неробочого ходу трифазних трансформаторів з плоскими стрижневими магнітними системами на базі методів схемного і 3D моделювання, гармонійного аналізу і симетричних складових. Він характеризується високою ефективністю чисельної реалізації і точністю для перехідних процесів включення трифазного трансформатора без навантаження. Встановлено, що система фазних струмів неробочого ходу характеризується несинусоїдністю та несиметричністю. У гармонійному складі цих струмів переважають 1-я, 5-я і 7-я гармоніки, але при цьому домінує перша гармонійна складова. На основі методу симетричних складових визначені параметри прямої і зворотної послідовності фаз першої гармоніки неробочого ходу і запропонована коригуюча методика, уточнююча традиційний інженерний підхід. Використання корекції параметрів для досліджених співвідношень струмів прямої і зворотної послідовності, підвищує точність розрахунку струмів неробочого ходу на 12-14% і втрат неробочого ходу на 9-11% в порівнянні з загальновідомими інженерними методиками проектування.*

Наукова новизна. *Запропоновано підхід для підвищення ефективності польового моделювання режиму неробочого ходу, який полягає в скороченні розмірів розрахункової області і переходу до 2D моделей. Реалізовано новий підхід визначення параметрів неробочого ходу трифазних трансформаторів з плоскими стрижневими магнітними системами на базі методів схемного і 3D моделювання, гармонійного аналізу і симетричних складових. Він характеризується високою ефективністю чисельної реалізації і точністю для перехідних процесів включення трифазного трансформатора без навантаження.*

Практична цінність. *Запропоновані в роботі підходи та методики дозволяють скоротити витрати обчислювальних ресурсів більше, ніж в 2,8 раз, часових ресурсів більше, ніж в 250 разів, при середньозваженій нев'язці не більше 3,6% і підвищити точність розрахунку струмів неробочого ходу на 12-14% і втрат неробочого ходу на 9-11% в порівнянні з загально-відомими інженерними методиками проектування.*

Ключові слова: *схемна модель; тривимірне моделювання; трифазний трансформатор; неробочий хід, електромагнітне поле; метод скінченних елементів; енергія магнітного поля; гармонійний аналіз; несинусоїдальні і несиметричні струми.*

APPROACH TO DETERMINATION OF NO LOAD CURRENT OF THREE-PHASE POWER TRANSFORMERS WITH PLANE RODS MAGNETIC SYSTEMS

DIVCHUK T.E. Senior Lecturer, Department of Electrical Machines, Zaporozhye National Technical University, Ukraine, *e-mail: DIV2009@i.ua;*

YARYMBASH D.S. Dr. Tech. Sci., Associate Professor, Head of the Department of Electrical Machines, Zaporozhye National University, Ukraine, *e-mail: yarymbash@gmail.com;*

YARYMBASH S.T. PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electrical Machines, Zaporozhye National Technical University, Ukraine, *e-mail: kstj06@gmail.com;*

KYLYMNYK I.M. PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of High Mathematics, Zaporozhye National Technical University, Ukraine, *e-mail: dnukim76@gmail.com;*

KOTSUR M.I. PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electrical and Electronic Apparatus, Zaporozhye National Technical University, Ukraine, *e-mail: kotsur8@gmail.com;*

BEZVERKHNIA Y. Postgraduate student, Department of Electrical and Electronic Apparatus, Zaporozhye National Technical University, Ukraine.

Purpose. *Development a new effective approach for determining the open-circuited transformer parameters by implementing a combination of a schematic and spatial mathematical model of nonstationary electromagnetic fields in three-phase transformers, taking into account the constructive structure of the active part, the nonlinearity of the*

magnetic properties of electrical steels providing high accuracy and computational efficiency.

Methods. *The researches were carried out using the methods of the electromagnetic field theory, the theory of electrical circuits, the theory of power transformers, mathematical physics, the finite element method, regression analysis methods.*

Results. *Theoretical researches of electromagnetic processes based on numerical realization of a three-dimensional mathematical model of a power three-phase transformer in open-circuited operation are carried out. An approach is proposed for improving the field simulation efficiency of the open-circuited operation, which consists in reducing the dimension of the computational domain and the transition to 2D models. It allow reducing the computing resources cost more than 2.8 times, time resources more than 250 times at a weighted average discrepancy of not more than 3.6%. The regularities of the distribution of flux density and the energy of the magnetic field for the active part of the transformer in open-circuited operation are determined. Their quantitative ratio value for the rods of different phases, which determining the ratio of the currents and resistances of the forward and reverse sequences of the transformer are calculated. A new approach to determine the open-circuited parameters of three-phase transformers with flat rod magnetic systems, based on the methods of circuit and 3D modeling, harmonic analysis and symmetrical components is realized. It characterized by high efficiency of numerical realization and accuracy for transient processes in switching moment of the three-phase transformer without loads. System of phase idle currents, characterized by non-sinusoidality and asymmetry, is proved. The harmonic composition of these currents is dominated by the 1st, 5th and 7th harmonics, but the first harmonic component predominates. The parameters of the forward and reverse sequence of the phases of the first harmonic for open-circuited operation, based on symmetrical components method were determinated. A corrective technique, which clarifies the traditional engineering approach, is proposed. The use of parameter correction for the researched ratios of the currents of the forward and reverse sequences will been increase the accuracy of calculation of the idle current by 12-14% and the idle losses by 9-11% in comparison with the generally known engineering design techniques.*

Originality. *An approach is proposed for improving the efficiency of field simulation of the open-circuited operation, which consists in reducing the dimension of the computational domain and the transition to 2D models. A new approach of determination of the open-circuited parameters of three-phase transformers with flat rod magnetic systems based on the methods of circuit and 3D modeling, harmonic analysis and symmetrical components is realized. It characterized by high efficiency of numerical realization and accuracy for transient processes in switching moment of the three-phase transformer without loads.*

Practical value. *The approaches and techniques allows to reduce the cost of computing resources by more than 2.8 times, time resources more than 250 times, with a weighted average discrepancy of not more than 3.6%, and increasing the accuracy of calculation of idle currents by 12-14% and losses of idling by 9-11% in comparison with the well-known engineering methods of designing.*

Keywords: *schematic model; three-dimensional simulation; three-phase transformer; open-circuited operation; finite element method; magnetic field energy; harmonic analysis; non-sinusoidal and asymmetrical currents.*

REFERENCES

[1]. Tikhomirov, P. M. (1986). Raschet transformatorov. Moscow: Energoatomizdat, 528. (in Russian).

[2]. Kulkarni, S.V., Khaparde, S.A. (2004). Transformer Engineering, Design and Practice, New York: Marcel Dekker, 478. (in English).

[3]. Pridubkov, P. Y., Khomenko, I. V. (2010). About the charts of substitution of ideal transformer. *Energy saving. Power engineering. Energy audit*, 2, 55–61 (in Russian).

[4]. Roginskaya, L.E., Gusakov, D.V. (2014). Simulation and experimental study of three-phase transformer with twisted tape flat and spatial magnetic cores. *Bulletin of the South Ural State University: Power Engineering*, 14, 4, 76–83. (in Russian).

[5]. Milyih, V. I., Polyakova N. V. (2013) An analysis of harmonic composition the AC magnetic field associated with a rotating rotor turbine generator, at idle speed and short circuit modes, Electrical Engineering And Power Engineering, 2. 5–12. DOI: 10.15588/1607-6761-2013-2-1.

[6]. Novash, I.V., Rumiantsev, Yu.V. (2015). Three-phase transformer parameters calculation considering the core saturation for the matlab-simulink transformer model. *Energetika*, 1, 12–24. (in Russian).

[7]. Leon, F., Semlyen, A. (1994). Complete Transformer Model for Electromagnetic Transients. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 9, 1, 231-239. DOI: 10.1109/61.277694.

[8]. Majumder, R., Ghosh, S., Mukherjee, R. (2016). Transient Analysis of Single Phase Transformer Using State Model. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 5, 3, 3300–3306. DOI: 10.15680/IJIRSET.2016.0503107.

[9]. Kislitsyn, A.L. (2001). Transformers. Ulyanovsk: UlSTU, 76. (in Russian).

[10]. Ostrenko, M., Tykhovod, S. (2016). Calculation of losses in elements of construction of power transformers and reactors by finite element method with surface impedance boundary conditions. *Electrical Engineering And Power Engineering*, 2, 33-42. DOI: 10.15588/1607-6761-2016-2-4. (in Russian).

[11]. Tikhovod, S. (2015). Calculation of transients in transformer on the basis of magneto electrical equivalent schemes with the use of tchebyshev's polynomials. *Electrical Engineering And Power Engineering*, 2, 5-14. DOI: 10.15588/1607-6761-2015-2-1. (in Russian).

[12]. Tykhovod, S. (2015). Improvement of iterative

methods of the nonlinear systems solution of state equations of magnetoelectric equivalent schemes. *Electrical Engineering And Power Engineering*, 1, 46-49. DOI: 10.15588/1607-6761-2015-1-8.

[13]. Yarymbash, S., Kylymnyk, I., & Yarymbash, D. (2010). Specific determination of equivalent circuit parameters in the furnace loop of the AC graphitizing furnace. *Electrical Engineering And Power Engineering*, 2, 36-43. DOI: 10.15588/1607-6761-2010-2-6.

[14]. Yarymbash, S., Kylymnyk, I., & Yarymbash, D. (2011). Features of electrothermal conditions of main bus packets of AC graphitizing furnace sections. *Electrical Engineering And Power Engineering*, 1, 64-69. DOI: 10.15588/1607-6761-2011-1-10.

[15]. Yarymbash, D., Yarymbash, S., Divchuk, T., & Kylymnik, I. (2016). Determination features of the power transformer short circuit parameters through field modeling. *Electrical Engineering And Power Engineering*, 1, 12-17. DOI: 10.15588/1607-6761-2016-1-2 (in Russian).

[16]. Yarymbash, D., Yarymbash, S., Divchuk, T., & Kylymnik, I. (2016). The features of magnetic flux distribution of the idling mode of the power transformers. *Electrical Engineering And Power Engineering*, 2, 5-12. DOI: 10.15588/1607-6761-2016-2-1. (in Russian).

[17]. Popov, G.V., Tikhonov, A.I., Klimov, D.V. (2007). The mathematical model of dynamic transformer working conditions on the basis of magnetic field calculations using finite element method. *Vestnik IGEU*, 3, 11-15. (in Russian).

[18]. Ketabi, A., Naseh, M. (2012). Single-phase transformer modeling for inrush currents simulation using differential evolution. *European Transaction on Electrical Power*, 22, 3, 402–411. DOI: 10.1002/etep.614.

[19]. Rashtchi, V., Rahimpour, E., Rezapour, E. M. (2011). Parameter identification of transformer detailed model based on chaos optimisation algorithm. *IET Electric Power Applications*, 5, 2, 238–246. DOI: 10.1049/iet-epa.2010.0147.

[20]. Paikov, I.A., Tikhonov, A.I. (2015). Analysis of power transformer electromagnetic calculation models. *Vestnik IGEU*, 3, 38–43. (in Russian).

[21]. Jazebi, S., de León, F., Farazmand, A., Deswal, D. (2013). Dual Reversible Transformer Model for the Calculationof Low-Frequency Transients. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 28, 4, 2509–2517. DOI: 10.1109/TPWRD.2013.2268857.

[22]. Yarymbash, D., Kotsur, M., Yarymbash, S., & Kotsur, I. (2017). Features of parameter determination of the induction motor substitution circuit for short-circuit mode. *Electrical Engineering And Power Engineering*, 1, 24–30. DOI: 10.15588/1607-6761-2017-1-4

[23]. Podol'tsev, A.D., Kontorovich, L.N. (2011). Numerical Simulation of Electric Currents, Magnetic Field and Electrodynamic Forces in Power Transformer at Emergency Operation Using MATLAB/SIMULINK and COMSOL. *Technical Electrodynamics*, 6, 3–10. (in Russian).

[24]. Yarymbash, D.S. (2015). The research of electromagnetic and thermoelectric processes in the AC and DC graphitization furnaces. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 3, pp. 95–102 (in Russian).

[25]. Yarymbash, D.S., Oleinikov, A.M. (2015). On specific features of modeling electromagnetic field in the connection area of side busbar packages to graphitization furnace current leads. *Russian Electrical Engineering*, 86, 2, 86–92. DOI: 10.3103/S1068371215020121

[26]. Yarymbash, D., Kotsur, M., Yarymbash, S., & Kotsur, I. (2016). Features of three-dimensional simulation of the electromagnetic fields of the asynchronous motors. *Electrical Engineering And Power Engineering*, 2, 43-50. DOI: 10.15588/1607-6761-2016-2-5

[27]. Slavutskiy, A. (2015). Accounting the residual magnetization in the transformer for the modeling of transients. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 1, 122-130. (in Russian).

[28]. Cundeva, S. (2008). A Transformer Model Based on the Jiles-Atherton Theory of Ferromagnetic Hysteresis. *Serbian Journal of Electrical engineering*, 5, 1, 21–30. DOI: 10.2298/SJEE0801021C

[29]. Wagner, B., Renhart, W., Magele, Ch. (2008). Error Evaluation of Surface Impedance Boundary Conditions With Magnetic Vector Potential Formulation on a Cylindrical Test Problem. *IEEE Trans. on Magn*, 44, 6, 734–737. DOI: 10.1109/TMAG.2007.915979

[30]. Ida, N., Lemenach, Y., Henneron, T. (2011). High Order Surface Impedance Boundary Conditions with the A- Formulation. *FACTA UNIVERSITATIS*, 24, 2, 147–155.

[31]. Leytes, L.V., Pintsov, A. M. (1974). Skhemy zameshcheniya mnogoobmotochnykh transformatorov, Moscow: Energiya, 192. (in Russian)

[32]. Leytes, L.V. (1981). Elektromagnitnyye raschoty transformatorov i reaktorov, Moscow: Energiya, 392 (in Russian)

[33]. Molotilov, B.V., Mironov, L.V., Petrenko, A.G., and et al. (1989). Cold-rolled electrical steel: Reference, ed., Moscow: Metallurgy, 167 (in Russian).

[34]. Tang Qi, Guo S., Wang Z. (2015). Magnetic flux distribution in power transformer core with mitred joints. *Journal of Applied Physics*, 117, 17, 17D522-1–17D522-4. DOI: 10.1063/1.4919119.

[35]. Strac, L., Zarko, D. (2015). Determination of electromagnetic properties of steel for prediction of stray losses in power transformers. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 23, 1357–1371. DOI: 10.3906/elk-1301-31

[36]. Paoli, G., Biro, O., Buchgraber, G. (1998). Complex representation in nonlinear time harmonic eddy current problems. *IEEE Trans. Magn*., 34,5, 2625–2628. DOI: 10.1109/20.717607

[37]. Yarymbash, D., Kilimnik, I., & Yarymbash, S. (2015). The dynamic adaptation of circuit models of short-circuit. *Electrical Engineering And Power Engineering*, 2, 65–70. DOI: 10.15588/1607-6761-2015-2-9.

УДК 628.9.037

МЕТОДОЛОГІЧНИЙ ПІДХІД ДО ПОБУДОВИ ЕНЕРГООЩАДНОЇ СИСТЕМИ АВАРІЙНОГО ОСВІТЛЕННЯ

ЛАВРИЧ Ю. М. канд. техн. наук, ст. наук. співр., ст. наук. співр. Інституту транспортних систем і технологій Національної академії наук України, Дніпро, Україна, *e-mail: lavrich@westa-inter.com;*

ПОГОРІЛА Л. М. мол. наук. співр. Інституту транспортних систем і технологій Національної академії наук України, Дніпро, Україна, *e-mail: plm@westa-inter.com;*

ПОДЧАСОВ А. Ю. мол. наук. співр. Інституту транспортних систем і технологій Національної академії наук України, Дніпро, Україна, *e-mail: pay@westa-inter.com.*

Мета роботи. *Розробка методологічного підходу до побудови надійної і ефективної системи аварійного освітлення, що працює від електрики, вироблюваної в результаті фотоелектричного перетворення світла штучного випромінювання видимого діапазону спектру лампи робочого (загального) освітлення без використовування стаціонарних електричних мереж.*

Методи досліджень. *Проведені експериментальні дослідження щодо побудови енергоощадної освітлювальної системи, яка працює без використанні стаціонарних джерел живлення.*

Отримані результати. *В ході дослідження була побудована експериментальна модель світильника, яка продемонструвала можливість реалізації аварійного освітлення на базі найбільш розповсюджених конструкцій люмінесцентних світильників стельового типу загального освітлення за рахунок електроенергії, що виробляється в наслідок перетворення штучного світлового потоку люмінесцентних ламп розміщеними на їх поверхнях сонячними панелями.*

Наукова новизна. *В рамках розробленого методологічного підходу вперш була показана можливість побудови багатофункціонального енергозберігаючого світильника, що поєднує функції робочого і аварійного освітлення, без використання стаціонарних систем живлення.*

Практична значимість. *На основі розробленого методологічного підходу можливо створення на базі стандартних конструкцій люмінесцентних освітлювальних систем багатофункціонального енергозберігаючого світильника, що допоможе вирішити проблему енергозбереження, яка придбала за останні роки особливу важливість в зв'язку, у тому числі, зі все зростаючим споживанням електроенергії на освітлювальні потреби.*

Ключові слова: *система освітлення; енергозбереження; аварійне освітлення; фотоелектричне перетворення; конструктивно-схемна реалізація.*

I. ВСТУП

Система освітлення є однією з найважливіших складових виробництва, за допомогою якої забезпечуються оптимальні умови праці і безпеки персоналу. для виробничого освітлення пріоритетними характеристиками є якість і надійність системи, збільшений термін служби, енергоефективність і енергозбереження, а також мінімальні вимоги по технічному обслуговуванню. Проблема енергозбереження в освітлювальних установках у всіх країнах світу набула за останні роки особливого значення, що в значній мірі пов'язано з безперервним збільшенням масштабів використання електроенергії на освітлення [1]. Так, в останньому десятиріччі XX-го століття освітлювальні установки ряду країн споживали до 20 % електроенергії, що виробляється [2]. Тому освітлювальні електроприлади представляють важливий об'єкт і поле для можливої економії енергетичних ресурсів. Щодо України, то в теперішній час в її народногосподарському комплексі для потреб освітлення використовується понад 260 млн. одиниць приладів, які споживають 14 % виробленої електроенергії [3]-[4]. Це говорить не про високоякісне і ефективне освітлення, а навпаки, такі високі показники викликані тим, що вже більше 10–15 років в різних галузях промисловості експлуатуються морально і фізично застарілі світлові прилади, в яких більш 70 % застосовується малоефективних джерел світла.

II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Серед всіх груп світильників з різними джерелами світла в Україні 30 % використання знаходять світлові прилади з люмінесцентними лампами, тоді як в Європі і Японії – 60-75 %. Для зовнішнього освітлення в Україні із загального числа світильників застосоване 2,5 % (Європа – 8%), тобто частка світильників зовнішнього освітлення мала і основне споживання енергії здійснюється системами внутрішнього освітлення. Енергетикам країни економія електроенергії, як це не парадоксально, не вигідна, і українські тарифи не заохочують до енергоефективності.

Задача раціонального використання електроенергії і зниження витрат на штучне освітлення відноситься до найважливіших проблем [5]. Серйозні структурні зміни, що відбуваються в світлотехнічній галузі завдяки появі нового покоління джерел світла, викликають необхідність перегляду підходів до створення систем освітлення і відходу від звичного традиційного використання стаціонарних електромереж. Однією з складових частин системи освітлення, що вимагає значних витрат як на оснащення, так і її енергопо-

© Лаврич Ю. М., Погоріла Л. М., Подчасов А. Ю., 2017
DOI 10.15588/1607-6761-2017-2-7

стачання, є аварійне освітлення.

В Україні не надають особливого значення енергоощадному аварійному освітленню. Система аварійного освітлювання складалась з люмінесцентного світильника і акумуляторної батареї, яка підключена до стаціонарної електромережі. Рішення найпростіше, але енерговитратне. Сучасний стан і тенденції розвитку в області освітлення вимагають розробки нових високоефективних технологій і зразків електротехнічного устаткування. Електрику можна одержати шляхом генерації нової електрики або зменшення витрати існуючого. Генерація нової вимагає капітальних витрат і будівництва нових потужностей, що значно дорожче, ніж енергозбереження. Найпоширенішим методом економії електроенергії є оптимізація споживання електрики на освітлення.

Вартість створення кіловата генеруючих потужностей на електростанціях різного типу складає приблизно 1–3 тис. дол. США, а зниження встановленої потужності на кіловат освітлення коштує 150–200 дол. США. Це величезна різниця і, крім того, це пов'язано і з рішенням найважливішої проблеми зниження шкідливих викидів в атмосферу [6].

На зміну уявленням про освітлювальну установку, як сукупність її лампових і світлоприладних компонентів, приходить розуміння того, що це складна технічна система. Майже фантастична сьогодні система освітлення майбутнього – це система, яка працює незалежно від мережі електропостачання, багатофункціональна, адаптивна і інтелектуальна, більш рентабельна, ніж сучасні системи освітлення. Така система буде безпечною і стабільною, екологічно чистою.

Наявність значної кількості технічних рішень по аварійному освітленню свідчить про актуальність питання аварійного освітлення, проте технічні рішення ефективні переважно для енергозберігаючого освітлення вулиць міст в темний час або для забезпечення індивідуального освітлення в різних сферах діяльності від побуту до виробництва, за рахунок використовування енергії природного сонячного випромінювання [7]. Тому, природно, виникає ідея – більш ефективно використовувати випромінювання джерел світла, світильників робочого освітлення, спектр яких лежить в області природного сонячного випромінювання – ні марно для нагріву предметів або простору, а для отримання електричної енергії.

III. МЕТА РОБОТИ

Мета роботи полягає в розробці енергозберігаючої системи освітлення з використовуванням штучного випромінювання джерел світла, спектр якого близький до спектру природного сонячного випромінювання.

IV. ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ ТА АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ

В рамках обґрунтовування методології підходу до побудови ефективної системи освітлення на експериментальній установці були проведені дослідження можливостей системи при використанні в якості імітаторів сонячного випромінювання (ІСВ) різних джерел світлу. Загальний вид експериментальної установки представлений на рис. 1.

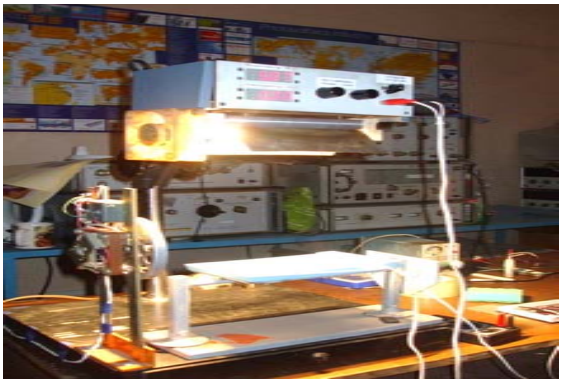


Рисунок 1. Експериментальна установка, загальний вид

До складу експериментальної установки належать імітатор сонячного випромінювання, пристрій вимірювання освітленості, батареї сонячні кремнієві, пристрій регулювання, пристрій вимірювання температури, пристрій індикації і відображення.

В якості джерела імітатора сонячного випромінювання використовувалась лампа галогенна ДРТІ потужністю P=1000 Вт, U=235 В, I=14 А, спектр світлового потоку якої близький до спектру сонячного випромінювання [8], відносна спектральна характеристика якої показана на рис. 2 [9].

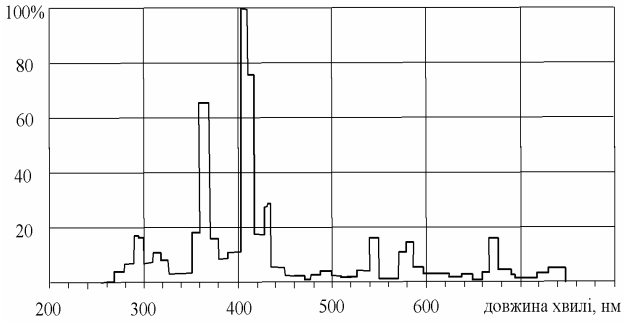


Рисунок 2. Спектральна характеристика лампи ДРТІ

Вся поверхня батареї сонячної кремнієвої (БСК) знаходилась в куту проходження світлового потоку. Для забезпечення спрямованості світлового потоку на БСК імітатор сонячного випромінювання має відбивач. В експериментальних дослідженнях були використані батареї сонячні кремнієві БСК-2 ТУ 48-0515-03.019-92 виробництва України – 20 шт.

Пристрій вимірювання освітленості призначений для регуляції опору навантаження БСК, перетворення, вимірювання параметрів батареї і відображення результатів. Високе тепловиділення лампи було використано для моделювання температурного впливу на параметри характеристик роботи БСК за рахунок зміни відстані між імітатором сонячного випромінювання і БСК, що досягалося переміщенням джерела ви-

промінювання на пристрої регулювання. Таким чином було проведено дослідження впливу температури на характеристики БСК. Зміна режиму теплового впливу додатково можлива за рахунок зміни інтенсивності повітряного охолоджування поверхні, на яку падає світловий потік. Для цього в пристрою регулювання додатково передбачений режим управління характеристиками теплового режиму роботи батареї БСК за рахунок регуляції обертання вентилятора обдуву галогенної лампи, включно до зупинки.

Виходячи з конструктивно-схемних особливостей БСК для вимірювання температури був застосований безконтактний метод за допомогою цифрового приладу ДТ838. Помилка вимірювання у діапазоні (–20 … +300)°С складала 3 %. Освітлення від імітатору сонячного випромінювання вимірювалося за допомогою люксометру фотоелектричного загального призначення Ю116. Батарея БСК-2 складається з двадцяти послідовно сполучених окремих кремнієвих фотоелементів, вмонтованих в корпус конфігурацією 5х4 елемента, і має такі вихідні параметри: напруга на виході – не менше 9 В, номінальний струм при навантаженні 200 Ом – не менше 35 мА. Випробування здійснювалось при двох різних ступенях освітленості при навантаженні 200 Ом. Вихідні параметри БСК мали значення при освітленості $2{,}8\cdot10^4$ Лк: V_{xx}=6,4–9,3 В; $V_н$=4,9–6,8 В; $I_{кз}$=38–55 мА; $I_н$=19–35 мА; при освітленості $9{,}0\cdot10^4$ Лк: V_{xx}=7,4–9,7 В; $V_н$=5,7–7,9 В; $I_{кз}$=60–130 мА; $I_н$=27–35 мА.

Вимірювання вихідної напруги для серії БСК-2 з 20 шт. при різних значеннях температури показали зниження напруги в середньому на 0,8-2,32 В при зміні температури від 45 до 83°С, що свідкує про значну чутливість характеристик БСК-2 до температури. Не зважаючи на широке використання газорозрядних ламп, забезпечення режиму оптимального перетворення світлового випромінювання для ламп цього типу, навіть для відкритої архітектури світильників, є проблема досить складна [5]. Крім того, конструкція світильника такого типу (розміщення ламп, діаграма світлового потоку ламп) не дозволяє виконувати її для встановлення сонячної батареї з метою перетворювання енергії світлового потоку в електричну. Спектр ламп знаходиться в діапазоні 320-440 нм, що теж не відповідає оптимальної ефективності сучасних сонячних батарей.

На даний час в якості аварійних світильників евакуаційного освітлення найбільш широко застосовують люмінесцентні. Побудова сучасних систем евакуаційного освітлення здійснюється шляхом використовування енергії окремої аварійної електромережі або використання автономних світильників аварійного освітлення, джерелом електроенергії для яких є різні типи накопичувачів електроенергії (частіше всього акумулятори), підключених до робочої електромережі. Задача, що потребує свого рішення, полягає в побудові економічного, безпечного і з тривалим терміном служби пристрою (світильника) аварійного освітлення на основі найпоширеніших типових конструкцій промислових світильників робочого (загального) освітлення, джерелом енергії якого є енергія світлового випромінювання штучних джерел світла світильника робочого (загального) освітлення, без використовування енергії як природного сонячного випромінювання, так і стаціонарних електричних мереж, конструктивно-схемна реалізація якого в суміщеному (загальному) корпусі дозволяє формування незалежних функцій робочого (загального) та аварійного освітлень. Цілком очевидно, що підвищення надійності і енергозбереження роботи системи евакуаційного освітлення можна досягти в тому випадку, коли вона енергонезалежна, тобто не підключена до електричної мережі робочого або аварійного освітлення, і реалізується автономне функціонування робочого і аварійного освітлень. Основою побудови такого пристрою (світильника) аварійного освітлення є можливість отримання електричної енергії в наслідок перетворенні енергії видимого спектру штучного світлового випромінювання люмінесцентних ламп світильника робочого освітлення в процесі робочого освітлення приміщень (з живленням від стаціонарної мережі) в електричну енергію за допомогою фотоелектричної панелі. Як відомо, розряд в люмінесцентній лампі супроводжується випромінюванням в діапазоні ультрафіолетового спектру (приблизно 254 нм) [10]. Ультрафіолетове випромінювання збуджує в люмінофорі люмінесцентної лампи світильника робочого освітлення свічення в видимої частині спектра з довжиною хвилі в межах від 380 до 760 нм, яке сприймається перетворювачами фотоелектричної панелі.

Спектри випромінювання найбільш масово використовуваних люмінесцентних ламп FSL 18 Вт Feron і Fluora 18 Вт Osram [11] приведені на рис. 3 и 4, відповідно.

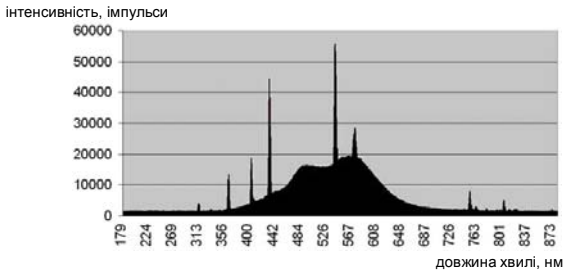


Рисунок 3. Спектр випромінювання FSL 18 Вт Feron

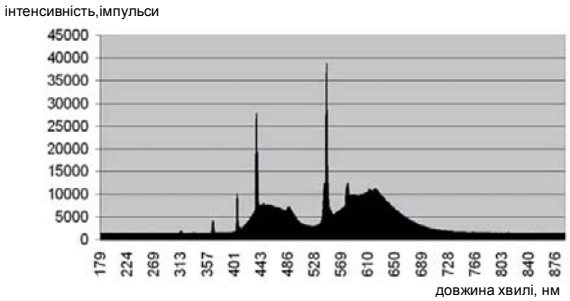


Рисунок 4. Спектр випромінювання Fluora 18 Вт Osram

Світловий потік люмінесцентної лампи потужністю 18 Вт може досягати 1350 Лм, при потужності лампи 36 Вт – 3350 Лм і при потужності лампи 58 Вт – 5200 Лм. У більшості джерел світла випромінювання світлового потоку відбувається більш-менш рівномірно у всі сторони. Найпоширенішим способом побудови системи робочого освітлення більшості типів приміщень є вживання нерухомо встановлених люмінесцентних світильників (навісних або вбудованих) 2х18 Вт, 2х36 Вт, 2х58 Вт, 4х18 Вт та інших потужностей. Найбільш широко застосовується для робочого освітлення світильники, в яких використаються чотири люмінесцентні лампи 4х18 Вт. Спектр штучного випромінювання люмінесцентних трубчастих ламп залежить від типу лампи і лежить в діапазоні 380-760 нм, тобто в діапазоні видимої частини спектру випромінювання. Як видно з рисунків, лампи FSL 18 Вт Feron і Fluora 18 Вт Osram не мають випромінювання в ультрафіолетовій області, а тільки у видимій частині спектру. Максимум випромінювання люмінесцентних трубчастих ламп відповідає діапазону 500-600 нм в залежності від кольору.

Як видно з рис. 3 і 4, максимальні спектральні характеристики фотоелектричних батарей майже співпадають з максимумами видимих спектрів випромінювання – природного сонячного та штучного – люмінесцентних ламп. Таким чином, спектри штучного випромінювання люмінесцентних ламп знаходяться в області видимого спектру – найефективнішої області спектру перетворення світлової енергії сучасними фотоелектричними батареями, що дозволяє побудову світильника аварійного освітлення на основі фотоелектричної панелі.

Запропонований пристрій аварійного освітлення відображений на рис. 5.

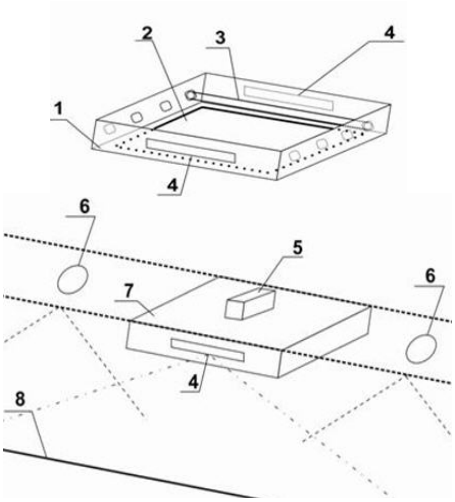


Рисунок 5. Пристрій аварійного освітлення

Він реалізується в світильнику робочого освітлення з відкритою архітектурою, в якому в якості штучного джерела видимого спектра світового випромінювання використаються чотири люмінесцентні лампи потужністю 18 Вт кожна. На рисунку цифрами позначено: 1 – корпуса люмінесцентного світильника робочого освітлення; 2 – фотоелектрична панель; 3 – люмінесцентні лампи світильника робочого освітлення; 4 – лампи аварійного освітлення; 5 – накопичувач; 6 – датчик руху; 7 – тильна сторона корпусу люмінесцентного світильника робочого освітлення; 8 – освітлювана поверхня шляху евакуації.

Оскільки для реалізації пристрою аварійного освітлення використається тільки корпус світильника робочого освітлення для розміщення його елементів, а електричні схеми є незалежними, то можлива реалізація незалежних і автономних функцій робочого і аварійного освітлень в загальному корпусі. Елементі, що входять до складу пристрою (світильника) аварійного освітлення, позначені цифрами 2, 4, 5 і 6. В загальному корпусі люмінесцентного світильника розміщені як сам світильник робочого освітлення в реалізованому конструктивно-схемному варіанті виконання, так і пристрій (світильник) аварійного освітлення. Автономні електрогенеруючі частини такої конструкції суміщеного світильника представляють: стаціонарна електромережа – в режимі робочого освітлення і джерело електроенергії на основі фотоелектричної панелі – в режимі аварійного освітлення. В процесі живлення від стаціонарної електромережі за рахунок штучного випромінювання трубчастих люмінесцентних ламп 3 світильника робочого освітлення відбувається освітлення як приміщень, в яких встановлені світильники, так і поверхні фотоелектричної панелі 2, встановленої на підставі люмінесцентного світильника робочого освітлення 1. Оскільки режим освітлення від стаціонарної електромережі є переважним, в процесі безперервного випромінювання трубчастих люмінесцентних ламп 3 перетворювачі фотоелектричної панелі 2 значну частину часу перетворюють енергію світлових хвиль люмінесцентних ламп 3 в електричну енергію. Важливо, що істотний вплив на характеристики фотоелектричної панелі надає не стільки потужність джерела, скільки спектральний склад випромінювання [12].

Фотоелектрична панель забезпечує максимальний коефіцієнт корисної дії (ККД) при температурі її поверхні +25...+30°С [13], що легко забезпечується відкритою конструкцією світильника робочого освітлення, в якому в якості джерела світла використаються люмінесцентні лампи. Сама люмінесцентна лампа з низьким рівнем тепловиділення і архітектура конструкції світильника дозволяють забезпечити необхідний температурний режим роботи фотоелектричної панелі і виключити вплив температури на ККД фотоелектричної панелі в загальному корпусі світильника. Накопичення енергії здійснюється в накопичувачі 5, навантаженням якого є лампи світильника аварійного освітлення 4, вибір накопичувача визначається, виходячи з необхідного часу аварійного освітлення і потужності ламп аварійного освітлення. Спосіб установки ламп аварійного освітлення безпосередньо до корпусу світильника дозволяє спростити електричну схему з'єднання накопичувача 5 і ламп аварійного

освітлення 4, значно зменшити довжини монтажних дротів, істотно зменшити втрати електричної енергії в сполучних дротах.

Управління режимом роботи пристрою виконує встановлений поряд із світильником датчик руху 6, цільовою функцією якого є забезпечення оптимальної роботи пристрою аварійного освітлення і зменшення витрати електроенергії накопичувача – фактично світильник відстежує людей, що рухаються. Датчик руху 6 у міру проходження вимикає (із затримкою) поточний світильник аварійного освітлення 4 і включає наступний на шляху просування до виходу. Такий режим роботи аварійного освітлення забезпечується вибором необхідної діаграми виявлення датчика руху 6. Найефективнішим типом джерела світла аварійного освітлення можуть бути світлодіоди з малим енергоспоживанням і незначними масогабаритними параметрами і високою світловою віддачею. В якості накопичувача 5 оптимальним є застосування гібридної системи, коли спільно використовуються хімічні джерела живлення та іоністори. Іоністори з'єднуються послідовно так, щоб забезпечити узгодження по напрузі з акумулятором. При об'єднанні іоністорів і хімічних акумуляторів в одному блоці живлення їх недоліки взаємно компенсуються [14]. Використання в якості випромінювачів світлодіодів, які характеризуються напругою виключення (замикання) вище напруги повного розряду акумуляторної батареї, забезпечує неможливість її повного розряду. Все це сприяє підвищенню надійності пристрою аварійного освітлення.

Вольт-ватна характеристика електрогенеруючої системи аварійного світильнику P_i на базі робочого люмінесцентного світильника стельового типу (4x18) приведена на рис. 6.

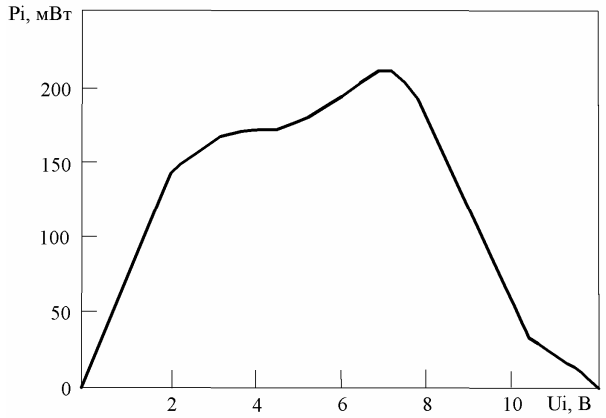


Рисунок 6. Вольт-ватна характеристика світильника аварійного освітлення

Ефективність роботи пристрою аварійного освітлення можна значно підвищити шляхом вживання каскадних сонячних елементів [15]-[16], які забезпечують розширення спектру перетворення. Наприклад, вживання каскадного сонячного елемента GaAs і GaSb дозволяє ефективне використання видимого і інфрачервоного діапазонів спектру випромінювання джерела світла [17], що робить можливим використання пристрою з різними джерелами штучного випромінювання.

Раніше проведені автором дослідження фотоелектричних панелей тривалого збереження (виробництво України) показали, що витрати ресурсу панелей становлять в середньому не більше 1,5 – 1,8 %, а сучасні – не більш 1 % потенційної потужності генерації на рік [18], що вказує на можливість довгострокового їх використання в енергозберігаючих системах аварійного освітлення.

V. ВИСНОВКИ

Результати досліджень побудови електрогенеруючої системи з використанням штучного випромінювання сонячної панелі, совмещеної з робочим світильником, показали, що при освітленні $4{,}5 \cdot 10^3$ Лк напруги холостого ходу та при навантаженні, $V_{СПхх}$ і $V_{СП,}$ склали 11,15 В і 6,4 В відповідно. З урахуванням джерела енергії для аварійного освітлення і незначного часу роботи аварійного освітлення модель пристрою аварійного освітлення є економічною і надійною. Пристрій є енергозберігаючим завдяки тому, що для організації аварійного освітлення не потрібні окремі електричні мережі аварійного освітлення.

Апробація експериментального зразка світильника аварійного освітлення підтвердила можливість побудови надійних і ефективних систем аварійного освітлення, що використовують енергію видимого спектру штучного світлового випромінювання люмінесцентних ламп світильника робочого освітлення.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

[1]. Самбрус Е. Плоды освещения / Е. Самбрус // Строительство и реконструкция. – 2003. – № 1-2. – С. 28-29.

[2]. Пилипчук Р.В. Проблема енергозбереження в освітлювальних установках / Р.В. Пилипчук, Р.Ю. Яремчук // Світлолюкс. – 2003. – № 2. – С. 10-13.

[3]. Айзенберг Ю.Б. Энергоэффективное освещение. Проблемы и решения / Ю.Б. Айзенберг // Энергосовет. – 2010. – № 6 (11). – С. 20-26.

[4]. Ципленков Д.В. Методи та засоби зниження технічних втрат електроенергії в елементах систем електропостачання / Д.В. Ципленков, П.Ю. Красовський // Електротехніка та електроенергетика. – 2015. – № 1. – С. 77-82. DOI: 10.15588/1607-6761-2015-1-13

[5]. Дьяченко В.В. Формирование программы энергосбережения для систем электроснабжения / В.В. Дьяченко // Электротехника и электроэнергетика. – 2015. № 1. – С. 70-76. DOI: 10.15588/1607-6761-2015-1-12

[6]. Сапрыка А.В. Повышение энергоэффективности осветительных комплексов с учетом качества электрической энергии / А.В. Сапрыка. – Харьков: ХНАМГ, 2009. – 126 с.

[7]. Ярымбаш Д.С. Особенности идентификации интенсивности солнечной радиации при проектировании солнечных электростанций / Д.С. Ярымбаш, Ю.В. Даус // Электротехника и электроэнергетика. – 2014. – №1. – С. 74-78. DOI: 10.15588/1607-6761-2014-1-12

[8]. Альферов Ж.И. Тенденции и перспективы развития солнечной энергетики / Ж.И. Альферов, В.М. Андреев, В.Ф. Румянцев // ФТП. – 2004. – Т. 38, Вып. 8. – С. 937-942.

[9]. Погосов А.Ю. Ионизирующая радиация: радиоэкология, физика, технологии, защита / А.Ю. Погосов, В.А. Дубковский // Наука и техника. – 2013. – 804 с.

[10]. Чарльз П. Энциклопедия электронных компонентов / П. Чарльз. – БХВ: СПб, 2017. – 368 с.

[11]. Спектральное распределение люминесцентных ламп // Каталог источников света OSRAM. – E-Check, 2000. – P. 4.00-4.30.

[12]. Тимченко С.Л. Влияние спектра излучения на характеристические кривые солнечной батареи / С.Л. Тимченко, О.Ю. Дементьева, Н.А. Задорожный // Физическое образование в вузах. – 2015. – Т. 21, № 1. – С. 3-12.

[13]. Ефимов В.П. Фотопреобразователи энергии солнечного излучения нового поколения / В.П. Ефимов // ФИП. – 2010. – Т. 8, № 2. – С.100-115.

[14]. Кошаров А.А. Ионистор в автономной электрической цепи [Текст] / А.А. Кошаров // Современная электроника. – 2014. – № 1. – С. 38-40.

[15]. Andreev V.M. Tandem Solar Cells Based on A^3B^5 Compounds / V.M. Andreev, V.D., Rumyantsev, L.B. Karlina, V.P. Khvostikov // Thermal Engineering. – 1997. – V.44.–No4. – P. 273-278.

[16]. Круковский С.И. Солнечные элементы на основе тандемных гетероструктур GaAs-InGaAs-AlGaAs / С.И. Круковский, Ю.Е. Николаенко // ТКЭА. – 2003. – № 6. – С. 39-41.

[17]. Лунин Л.С. Моделирование и исследование характеристик фотоэлектрических преобразователей на основе GaAs и GaSb / Л.С. Лунин, А.С. Пащенко // ФТТ. – 2011. – Т.81, Вып.9. – С. 71-76.

[18]. Лаврич Ю.Н. Исследование влияния длительного хранения на характеристики солнечных батарей / Ю.Н. Лаврич // II Міжнародна науково-практична конференція «Напівпровідникові матеріали, інформаційні технології та фотофольтаика». – Кременчук, 2013. – С. 79-81.

Стаття надійшла до редакції 11.04.2017

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ПОСТРОЕНИЮ ЭНЕРГОСБЕРГАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ АВАРИЙНОГО ОСВЕЩЕНИЯ

ЛАВРИЧ Ю. Н. канд. техн. наук, ст. научн. сотр., ст. научн. сотр. Института транспортных систем и технологий Национальной академии наук Украины, Днипро, Украина, *e-mail: lavrich@westa-inter.com;*

ПОГОРЕЛАЯ Л. М. мл. научн. сотр. Института транспортных систем и технологий Национальной академии наук Украины, Днипро, Украина, *e-mail: plm@westa-inter.com;*

ПОДЧАСОВ А. Ю. мл. научн. сотр. Института транспортных систем и технологий Национальной академии наук Украины, Днипро, Украина, *e-mail: pay@westa-inter.com.*

Цель работы. *Разработка методологического подхода к построению надежной и эффективной системы аварийного освещения, которая работает от электричества, производимого в результате фотоэлектрического преобразования света искусственного излучения видимого диапазона спектра лампы рабочего (общего) освещения без использования стационарных электрических сетей.*

Методы исследований. *Проведены экспериментальные исследования, касающиеся построения энергосберегающей осветительной системы, работающей без использования стационарных источников питания.*

Полученные результаты. *В ходе исследования была построена экспериментальная модель светильника, продемонстрировавшая возможность реализации аварийного освещения на базе наиболее распространенных конструкций люминесцентных светильников потолочного типа общего освещения за счет электроэнергии, вырабатываемой в результате преобразования искусственного светового потока люминесцентных ламп размещенными на их поверхностях солнечными панелями.*

Научная новизна. *В рамках разработанного методологического подхода впервые была показана возможность построения многофункционального энергосберегающего светильника, объединяющего функции рабочего и аварийного освещения, без использования стационарных систем питания.*

Практическая значимость. *На основе разработанного методологического подхода возможно создание на базе стандартных конструкций люминесцентных осветительных систем многофункционального энергосберегающего светильника, что поможет решить проблему энергосбережения, приобретшую за последние годы особенную важность в связи с все возрастающим использованием электроэнергии, в том числе на осветительные нужды.*

Ключевые слова: *система освещения; энергосбережение; аварийное освещение; фотоэлектрическое преобразование; конструктивно-схемная реализация.*

THE METHODOLOGICAL APPROACH FOR CONSTRUCTION OF ENERGY-EFFICIENT EMERGENCY LIGHTING SYSTEM

LAVRICH YU.N. Ph.D, Senior researcher, Senior staff scientist of the Institute of Transport Systems and Technologies of National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine, *e-mail: lavrich@westa-inter.com;*

POGORELAYA L.M. Junior researcher of the Institute of Transport Systems and Technologies of National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine, *e-mail: plm@westa-inter.com;*

PODCHASOV A.YU. Junior researcher of the Institute of Transport Systems and Technologies of National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine, *e-mail: pay@westa-inter.com.*

Purpose. *The research of methodological approach to construction of reliable and effective emergency lighting system, which works without the use of stationary electric networks from electricity, producible in result of photovoltaic conversion of artificial radiation from lamp of working (general) lighting in visible range of spectrum.*

Methodology. *The experimental researches concerned the construction of the energy-efficient emergency lighting system which works without the use of stationary power source are conducted.*

Originality. *Within the bounds of developed methodological approach the first time it was shown the possibility of multifunction energy-efficient lamp construction combining the working and emergency illumination functions without the use of the stationary power systems.*

Research results. *As result of research the experimental model of lamp was constructed showing the possibility of emergency illumination realization on the base of the most widespread common illumination luminescent lamps of ceiling type due to electric power produced at conversion of luminescent lamps artificial light stream by the sun panels placed on their surfaces.*

Practical value. *With use of the developed methodological approach on the base of standard constructions of the luminescent lighting systems it is possible to design the multifunction energy-efficient lamp, that will help to resolve the problem of energy-saving that gains in importance last years in connection with the all increasing electric power use including lighting needs.*

Keywords: *lighting system; energy-saving; emergency lighting; photovoltaic conversion; schematic realization.*

REFERENCES

[1]. Samburs, E. (2003) Plody osveshhenija. Stroitel'stvo i rekonstrukcija, 1-2, 28 – 29 (in Russian).

[2]. Pilipchuk, R.V., Jaremchuk, R.Ju. (2003) Problema energozberezhennja v osvitljuval'nih ustanovkah. Svitloljuks, 2, 10 – 13 (in Ukrain.).

[3]. Aizenberg, Ju.B. (2010) Jenergojeffektivnoe osveshhenie. Problemy i reshenija. Jenergosovet, 6(11), 20 – 26 (in Russian).

[4]. Ciplenkov, D.V., Krasovs'kij, P.Ju. (2015) Methods and means of technical losses reduction of electricity in the elements of power supply systems. Electrical Engineering And Power Engineering, 1, 77-82. DOI: 10.15588/1607-6761-2015-1-13.

[5]. D'jachenko, V.V. (2015) Creation of energy saving program for power supply systems. Electrical Engineering And Power Engineering, 1, 70 – 76. DOI: 10.15588/1607-6761-2015-1-12.

[6]. Sapryka, A.V. (2009). Povyshenie jenergojeffektivnosti osvetitel'nyh kompleksov s uchetom kachestva jelektricheskoj jenergii. Monografija. Har'kov: HNAMG, 126.

[7]. Yarymbash, D.S., Daus, Ju.V. (2014). Solar radiation intensity identification features for solar power stations designing. Electrical Engineering And Power Engineering, 1, 74 – DOI: 10.15588/1607-6761-2014-1-12.

[8]. Al'ferov, Zh. I., Andreev, V.M., Rumjancev, V.F. (2004) Tendencii i perspektivy razvitija solnechnoj jenergetiki. FTP, 38, 8, 937 – 942.

[9]. Pogosov, A. Ju., Dubkovskij, V. A. (2013). Ionizirujushhaja radiacija: radiojekologija, fizika, tehnologii, zashhita. M: Nauka I tehnika, 804.

[10]. Charl'z, P. (2017) Jenciklopedija jelektronnyh komponentov. S-Petersburg: BHV, 368.

[11]. Spektral'noe raspredelenie ljuminescentnyh lamp. (2000). Katalog istochnikov sveta OSRAM

[12]. Timchenko, S.L., Dement'eva, O.Ju., Zadorozhnyj N.A. (2015). Vlijanie spektra izluchenija na harakteristicheskie krivye solnechnoj batarei. Fizicheskoe obrazovanie v vuzah, 21, 1, 3–12.

[13]. Efimov, V.P. (2010). Fotopreobrazovateli jenergii sol-nechnogo izluchenija novogo pokolenija. FIP, 8, 2, 100 – 115 (in Russian).

[14]. Kosharov, A.A. (2014). Ionistor v avtonomnoj jelektricheskoj cepi. Sovremennaja jelektronika, 1, 38–40.

[15]. Andreev, V.M., Rumyantsev V.D., Karlina L.B., Khvostikov V.P. (1997). Tandem Solar Cells Based on A3B5 Compounds. Thermal Engineering, 44, 273–278.

[16]. Krukovskij, S.I., Nikolaenko, J. E. (2003). Solnechnye jelementy na osnove tandemnyh geterostruktur GaAs-InGaAs-AlGaAs. Tehnologija i konstruirovanie v radiojelektronnoj apparature 6, 39–41.

[17]. Lunin, L.S., Pashhenko, A.S. (2011). Modelirovanie i issledovanie harakteristik fotojelektricheskih preobrazovatelej na osnove GaAs i GaSb. FTT, 81, 9, 71 – 76 (in Russian).

[18]. Lavrich, Ju. N. (2013) Issledovanie vlijanija dlitel'no-go hranenija na harakteristiki solnechnyh batarej. Napivprovidnikovi materiali, informacijni tehnologiї ta fotovol'taika. Kremenchuk, 79 – 81.

УДК 621.314

АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ИЗМЕНЕНИЯ КРИТЕРИЕВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ДЛЯ ИНТЕРПРЕТАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ АРГ, В ИСПРАВНЫХ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ТРАНСФОРМАТОРАХ НЕГЕРМЕТИЧНОГО ИСПОЛНЕНИЯ

ШУТЕНКО О. В. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Передача электрической энергии» Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина, *e-mail: o.v.shutenko@gmail.com*;

Цель работы. *Исследовать характер динамики изменения критериев используемых для интерпретации результатов АРГ, в исправных высоковольтных трансформаторах, негерметичного исполнения.*

Методы исследования. *Теория временных рядов, регрессионный анализ, теория распознавания образов, метод контрольных уровней, метрические методы распознавания, диагностика по расстоянию до эталона.*

Полученные результаты. *По результатам исследований установлено, что в нормально работающих исправных трансформаторах, значения всех без исключения диагностических признаков, используемых для интерпретации результатов АРГ, изменяются случайным образом. Аварийные воздействия со стороны электрической сети, приводят к кратковременному появлению систематической составляющей в зависимостях концентраций и скоростей нарастания газов от продолжительности эксплуатации, и к кратковременной стабилизации значений отношений пар газов на уровне соответствующему данному энергетическому воздействию, а также к схожести графических образов.*

Научная новизна. *Выполненный анализ показал, что в трансформаторах негерметичного исполнения возникновение и развитие дефекта сопровождается не только изменением численных значений диагностических критериев, что известно и используется при диагностике, но и к существенному изменению характера зависимостей диагностических критериев от времени.*

Практическая ценность. *Полученные результаты дают возможность обнаружения развивающихся дефектов в негерметичных трансформаторах, на ранней стадии их развития, еще до того как значения концентраций газов превысят граничные значения, что позволит избежать разрушения изоляции, а также распознавать рост концентраций растворенных в масле газов, обусловленный влиянием аварийных режимов работы электрических сетей.*

Ключевые слова: *анализ растворенных в масле газов; концентрации газов; скорости нарастания; отношения газов; графические образы; динамика изменения; регрессионный анализ; контрольные уровни; диагностическое расстояние.*

I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время, для интерпретации результатов анализа растворенных в масле газов (АРГ) ведущими мировыми энергетическими и трансформаторостроительными компаниями используются несколько критериев: критерий граничных концентраций, критерий скоростей нарастания газов и значения отношений пар газов. При этом для каждого из критериев, известные стандарты [1]-[5], регламентирует граничные значения, которые значимо различаются между собой. В дополнении к перечисленным критериям различными национальными и ведомственными стандартами, рекомендуются к использованию графические методы интерпретации, предназначенные для распознавания типа прогнозируемого дефекта. Следует отметить, что во всех без исключения известных нормативных документах [1]-[5], для принятия решения о состоянии диагностируемого объекта используются, только количественные значения данных критериев, а вот динамика их изменения во времени практически не используются, что ограничивает возможности для раннего обнаружения развивающихся дефектов. В связи с этим анализ динамики изменения критериев, используемых для интерпретации результатов АРГ, в трансформаторах с различным состоянием, является актуальной и практически значимой задачей.

II. АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Вопросам усовершенствования методов и критериев, используемых для интерпретации результатов АРГ, посвящено достаточное количество публикаций. Как показал анализ, основными направлениями усовершенствования являются как корректировка граничных значений концентраций и скоростей нарастания газов [6]-[8], поиск новых отношений пар газов [9], так и разработка графических методов интерпретации [10]-[11]. Достаточно большое количество публикаций [12]-[17] посвящено вопросам использования аппарата нечеткой логики и нейронных сетей для интерпретации результатов АРГ. Несмотря на большой объем публикаций в открытых зарубежных источниках практически не рассматриваются вопросы анализа динамики изменения критериев, используемых для интерпретации результатов АРГ, во времени, а если и рассматриваются, как например, в [18]-[19] то только для значений концентраций газов. При этом анализ носит скорее качественный характер. В тоже время как показано в [20], одним из перспективных направ-

© Шутенко О.В., 2017
DOI 10.15588/1607-6761-2017-2-8

лений усовершенствования методов интерпретации результатов АРГ, является использование в качестве диагностических признаков не численных значений диагностических критериев, а характера их изменения во времени. Выполненные в работе [21] исследования показали, что при отсутствии дефекта в высоковольтных трансформаторах со свободным дыханием, значения концентраций газов, практически не зависят от продолжительности эксплуатации. Аналогичные исследования для трансформаторов с дефектами разного типа, выполненные в работе [22], показали наличие значимой систематической составляющей в зависимостях концентраций и скоростей нарастания газов от длительности эксплуатации. Однако динамика изменения значений скоростей нарастания газов, отношений пар газов и графических образов в исправных трансформаторах негерметичного исполнения, до настоящего времени не исследовалась, что и послужило поводом для написания данной статьи.

III. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является обнаружение различий в характере изменения во времени значений концентраций, скоростей нарастания, отношений газов, а также графических образов, построенных по результатам АРГ в трансформаторах с различным состоянием. Для обнаружения данных различий исследуется и анализируется изменений перечисленных выше критериев от длительности эксплуатации в исправных трансформаторах негерметичного исполнения, которые эксплуатируются в разных условиях.

IV. ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

В качестве исходных данных, для выполнения исследований, использовались результаты хроматографического анализа по Донецкой, Луганской, Полтавской, Сумской, Харьковской областям, Украины. Всего проанализированы результаты наблюдений по 426 трансформаторам, негерметичного исполнения, напряжением 110 и 330 кВ общим объемом 54658 значений. Все исследуемые трансформаторы находились в исправном состоянии. Суть исследований сводилась к оценке наличия систематической составляющей в зависимостях диагностических критериев от длительности эксплуатации, в исправных трансформаторах, которые эксплуатируются в разных условиях.

Измерение концентраций газов сопровождается погрешностями, особенно в области их малых значений. Известно [5], что чувствительность обнаружения газов хроматографом находится на уровне 10^{-4}-10^{-5} % об. При этом суммарная погрешность анализа, при значениях концентраций газов углеводородного ряда – 10 мкл/л (0,001% об.), может достигать 50%. Систематическая погрешность измерения концентраций газов, растворенных в масле, может достигать 19,7% [7] и растет по мере приближения концентраций к порогу чувствительности хроматографа. Для снижения вероятностей принятия ошибочных решений при диагностике оборудования по результатам АРГ в [4], рекомендуется выполнять диагностику по критерию скоростей нарастания газов, в случае если значения концентраций газов превышают граничные значения. Диагностика по значениям отношений пар газов или при использовании графических методов, согласно [4] может выполняться, если значения концентраций газов превышают регламентированный аналитический порог распознавания. Данные рекомендации учитывались при выполнении анализа динамики изменения графических образов и отношений пар газов (исключения составило лишь отношение CH_4/H_2 для исправных трансформаторов, которые работали в нормальном режиме. Это обусловлено крайне низким содержанием водорода в негерметичном оборудовании из-за его диффузии в атмосферу. Поэтому зависимости изменения во времени отношение CH_4/H_2 далее приводятся из соображений наглядности). В трансформаторах, которые работают в нормальных режимах, значения концентраций газов не превышают граничных значений, более того в негерметичных трансформаторах из-за процесса диффузии газов в атмосферу, значения измеренных концентраций не совпадают с реально образовавшимися значениями. Однако, поскольку целью исследования является не оценка значений скоростей нарастания газов, а анализ характера их изменения во времени, то значения скоростей нарастания газов определялись, если концентрации газов между измерениями превышали аналитический порог распознавания, что привело к различиям в объеме выборочных значений концентраций и скоростей нарастания газов. Исключение составил водород.

По аналогии с [20]-[22] для анализа динамики изменения значений концентраций и скоростей нарастания газов был использован математический аппарат регрессионного анализа. Такой тест эквивалентен однофакторному дисперсному анализу показателя качества на наличие систематического смещения среднего значения в различных интервалах времени эксплуатации [23]. Результаты АРГ были представлены в виде временных рядов, которые представляют собой двумерный массив значений длительности эксплуатации и концентраций газов. В качестве основной, принималась гипотеза об отсутствии значимого влияния длительности эксплуатации на концентрации растворенных в масле газов, т.е. H_0: b_1=0. Проверка основной гипотезы H_0 для всех временных рядов проводилась при уровне значимости α=0,05 в следующей последовательности:

Статистическая модель:

$$Y_i = b_0 + b_1 \cdot x_i + \varepsilon_i \quad (1)$$

Остатки распределены по нормальному закону:

$\varepsilon_i \sim N(0, \sigma^2)$ с $M[\varepsilon_i] = 0$; $D[\varepsilon_i] = \sigma^2$; $\mathrm{cov}[\varepsilon_i] = 0$.

2. Коэффициенты линейной регрессии b_1 и b_0 определялись с помощью метода наименьших квадратов. После чего рассчитывалось значение величины R^2, которая представляет собой отношение полезного

сигнала (суммы квадратов отклонений, обусловленной регрессией) к шуму (сумме квадратов отклонений относительно регрессии). Значение величины R^2 рассчитывалось по выражению.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n}(\hat{Y}_i - \bar{Y})^2}{\sum_{i=1}^{n}(Y_i - \bar{Y})^2} \qquad (2)$$

где: $\hat{Y}_i$ – значение концентрации анализируемого газа, рассчитанное по статистической модели с учетом значений коэффициентов b_1 и b_0; $\bar{Y}$ – математическое ожидание показателя

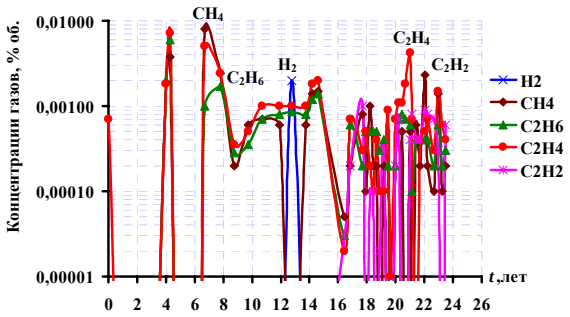
3. Критериальная статистика: $F_{1,\ n-2}$ вычислялась как функция оценки R^2:

$$F_{1,\ (n_i-2)} = \frac{R^2}{\left(1-R^2\right)}\left(n_i - 2\right) \qquad (3)$$

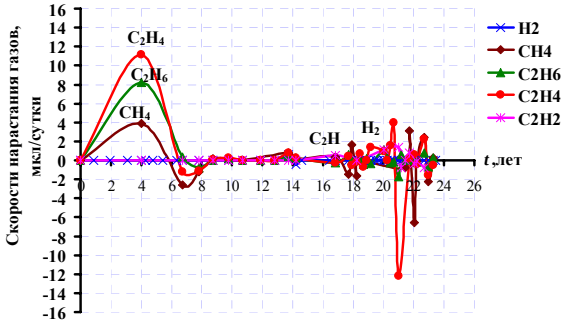
4. Статистика сравнения $F_{кр}=F_{1,\ (n-2)}$ – 95% точка F распределения с 1 и $(n_i$-2) степенями свободы.

5. Решение: основная гипотеза H_0 (b_1=0) отвергалась, если $F > F_{кр}$

Выполненный анализ показал, что для подавляющего большинства анализируемых временных рядов концентраций и скоростей нарастания газов углеводородного ряда и водорода, расчетное значение F-критерия не превышало, соответствующее критическое значение. Это свидетельствует о том, что шумовая компонента превышает систематическую составляющую, а, следовательно, зависимости концентраций газов и скоростей нарастания газов носят *случайный, стохастический характер*. Более того, для многих рядов значение углового коэффициента b_1 имеет отрицательное значение, другими словами концентрации газов могут и уменьшаться с увеличением продолжительности эксплуатации. Еще одним важным результатом, является значимые различия в характере временных зависимостей концентраций и скоростей нарастания газов для нормально работающих трансформаторов и трансформаторов подвергшихся аварийным режимам работы со стороны электрической сети. В качестве примера, на рис. 1 и 2 приведены зависимости концентраций газов и скоростей нарастания газов для нормально работающего трансформатора ТДНГ-31,5,110/35/6 (рис. 1) и трансформатора ТДТН-31,5/110/35/6 (рис. 2), который подвергся динамическому воздействию тока короткого замыкания. Как видно из рис. 1 для нормально работающих трансформаторов изменения концентраций и скоростей нарастания газов, носит исключительно случайный характер, а сами зависимости являются немонотонными. Что подтверждается результатами регрессионного анализа, приведенными в табл. 1. Как видно из табл. 1, при нормальной работе трансформаторов, для всех пяти газов углеводородного ряда и водорода, расчетные значения F- критерия не превышают критического значения, что свидетельствует о преобладании шумовой компоненты над систематической составляющей. При этом угловые коэффициенты для всех газов, кроме ацетилена имеют отрицательные значения, т.е. концентрации газов, на наблюдаемом промежутке времени снижаются. При нормальной работе трансформаторов значения скоростей нарастания также изменяются случайным образом (рис. 1 *б*). Как видно из рисунка на протяжении наблюдений имели место, как положительные (новообразование газов) так и отрицательные (диффузия газов в атмосферу) значения скоростей нарастания. При этом как видно из табл. 1 значения скоростей нарастания всех газов кроме ацетилена снижаются.



а



б

а – концентрации газов;
б – скорости нарастания газов;

Рисунок 1. Зависимость концентраций газов и их скоростей нарастания от длительности эксплуатации для трансформатора ТДНГ-31,5/110/35/6

Совсем иная картина наблюдается для трансформатора ТДТН-31,5/110/35/6, который подвергся динамическому воздействию тока короткого замыкания со стороны сети. Как видно из табл. 1, на анализируемом промежутке времени в зависимостях концентраций метана, этилена и ацетилена наблюдается преобладание систематической компоненты над, шумовой, т.е. значимый рост концентраций газов. При этом, как видно из рис. 2, максимальные значения и концентраций и модулей скоростей нарастания, для всех без исключения газов приходятся на один и тот же момент времени, а именно дату воздействия тока короткого замыкания. В тоже время рост газов не является устойчивым и после достижения максимума

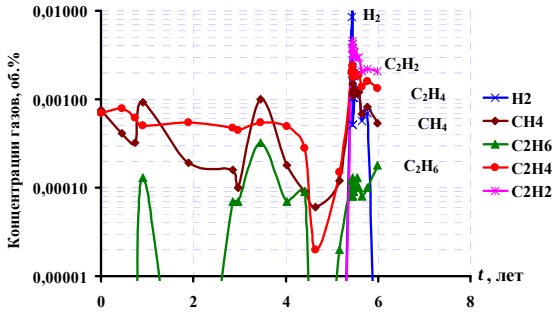
концентраций, вызванного воздействием тока короткого замыкания, значения концентраций постепенно снижаются.

Таблица 1. Результаты регрессионного анализа для трансформаторов ТДНГ-31,5,110/35/6 и ТДТН-31,5/110/35/6

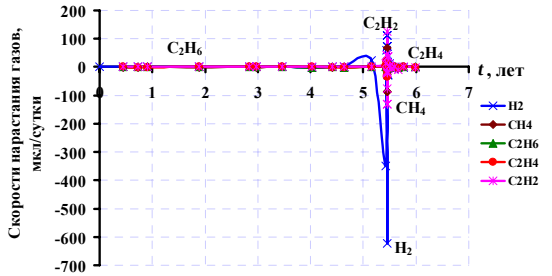
Газ	Коэффициенты линейной регрессии		R^2	F	$F_{крит}$
	b_0	b_1			
Трансформатор ТДНГ-31,5,110/35/6					
CH_4	0,001327	-0,000043	0,0502	2,22	5,41
C_2H_4	0,00144	-0,0000318	0,0264	1,13	5,41
C_2H_6	0,00101	-0,0000274	0,0436	1,91	5,41
C_2H_2	-0,000046	0,0000092	0,0983	4,57	5,41
H_2	0,0000582	-0,00000087	0,0004	0,018	5,41
R_{CH4}	0,543189	-0,047115	0,022	0,439	5,92
R_{C2H4}	2,293743	-0,1303213	0,061	1,84	5,609
R_{C2H6}	1,744374	-0,0900781	0,127	4,39	5,56
R_{C2H2}	-0,02737	0,0078552	0,0112	0,215	5,87
R_{H2}	0,0044286	-0,0001473	$9\ 10^{-5}$	0,003	5,41
Трансформатор ТДТН-31,5/110/35/6					
CH_4	-0,016512	$4{,}2452\ 10^{-7}$	0,239	8,79	5,609
C_2H_4	-0,028136	$7{,}1757\ 10^{-7}$	0,417	20,07	5,609
C_2H_6	-0,001392	$3{,}6096\ 10^{-8}$	0,145	4,77	5,609
C_2H_2	-0,075940	$1{,}89850\ 10^{-6}$	0,548	34,0	5,609
H_2	-0,037687	$9{,}43803\ 10^{-7}$	0,149	4,93	5,609
R_{CH4}	166,3111	-0,0041449	0,0084	0,228	5,633
R_{C2H4}	90,750453	-0,00226876	0,0127	0,346	5,633
R_{C2H6}	2,1019124	$-5{,}043\ 10^{-5}$	0,0004	0,011	5,633
R_{C2H2}	217,73229	-0,00543264	0,0049	0,133	5,633
R_{H2}	717,57561	-0,0179181	0,006	0,164	5,633

Значения концентраций ацетилена, превышает граничное значение, практически в 5 раз, что согласно [4], должно быть истолковано, как наличие дефекта, *без учета значений скоростей нарастания*. В тоже время именно, анализ динамики изменения скоростей нарастания газов (рис. 2 *б* и табл. 1), показывает что, несмотря на рост концентраций газов, случайная составляющая в зависимостях скоростей нарастания газов превалирует над систематической компонентой. Как видно из табл. 1 скорости нарастания газов на рассматриваемом промежутке имеют тенденцию к снижению, о чем свидетельствую отрицательные значения угловых коэффициентов регрессии. Это может быть объяснено кратковременным характером воздействия токов короткого замыкания, после которого значения концентраций газов начинают снижаться. Примечательно, что модули значения отрицательных скоростей нарастания для всех газов кроме ацетилена, превышают значения положительных скоростей нарастания (рис. 2 *б*). Т.е. после «внешнего возмущения система возвращается в исходное состояние».

При оценке динамики изменения отношений пар газов, важен не только характер зависимости, но и сами значения отношений пар газов. Для анализа динамики изменения отношений пар газов, удобно использовать метод контрольных уровней [24].



а



б

а – концентрации газов;
б – скорости нарастания газов;

Рисунок 2. Зависимость концентраций газов и их скоростей нарастания от длительности эксплуатации для трансформатора ТДТН-31,5/110/35/6

В качестве значений контрольных уровней естественно принять границы отношений пар газов, разделяющие области с различными типами дефектов, которые регламентированы в [4]. Динамика изменений значений отношений пар газов для трансформаторов ТДНГ-31,5,110/35/6 и ТДТН-31,5/110/35/6 приведена на рис. 3 и рис. 4. Как видно из рис.3 для нормально работающего исправного трансформатора значения отношений пар газов изменяются случайным образом. Это выражается тем, что для каждого нового измерения отношения пар газов, принимают значения соответствующие различным уровням. Такая же картина наблюдается и для трансформатора ТДТН-31,5/110/35/6, *но только до воздействия тока короткого замыкания* (рис. 4). *Сразу же после воздействия значения отношений пар газов кратковременно стабилизируются на одном уровне*, после чего, продолжают изменяться случайным образом. Действующим в Украине нормативным документом [4] для исправного состояния трансформаторов регламентированы следующие значения отношений пар газов: $0{,}1<CH_4/H_2<1$, $0{,}2<C_2H_4/C_2H_6$. Значение отношения C_2H_2/C_2H_4 согласно [4], является не характерным для исправного состояния, поскольку предполагается, что при отсутствии дефекта этилен и ацетилен в масле отсутствуют. Но, как видно из рис. 3 и 4 значения отношений пар газов (как для нормально работающего, так и для трансформатора подвергшегося воздействию тока короткого замыкания) выходят за области значений соответствующие исправному состоянию.

Это обусловлено как процессами диффузии газов в атмосферу, так и окислительными реакциями, которые согласно [25, 26] приводят к нетипично высокому содержанию этилена.

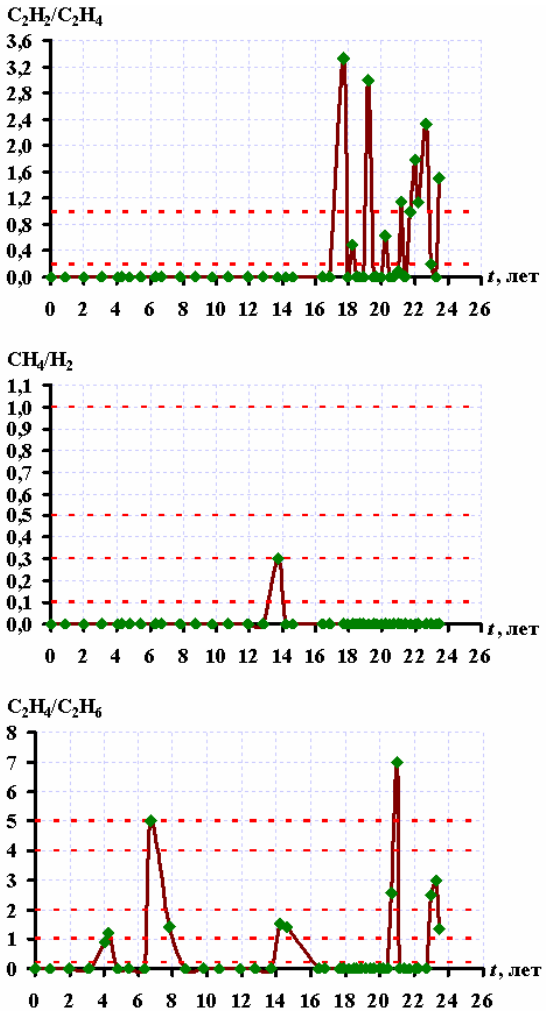


Рисунок 3. Динамика изменения отношений пар газов для трансформатора ТДНГ-31,5/110/35/6

Особый интерес представляет анализ динамики изменения графических образов, построенных по результатам АРГ для анализируемых трансформаторов. Выполненные в [22] исследования динамики изменения графических образов в трансформаторах с дефектами разного типа показали, что развитие дефекта в трансформаторах, сопровождается неизменностью образов, построенных по результатам АРГ для относительно медленно развивающихся дефектов и стабильным соответствием графических образов, дефектам разного типа для быстро развивающихся дефектов. Как показал анализ, в нормально работающих исправных трансформаторах графические образы изменяются случайным образом от измерения к измерению. В качестве примера на рис. 5 *а* приведены графические образы, построенные по результатам АРГ трансформатора ТДНГ-31,5/110/35/6, по первым 5 пробам, для которых концентрации газов превышали аналитический порог распознавания.

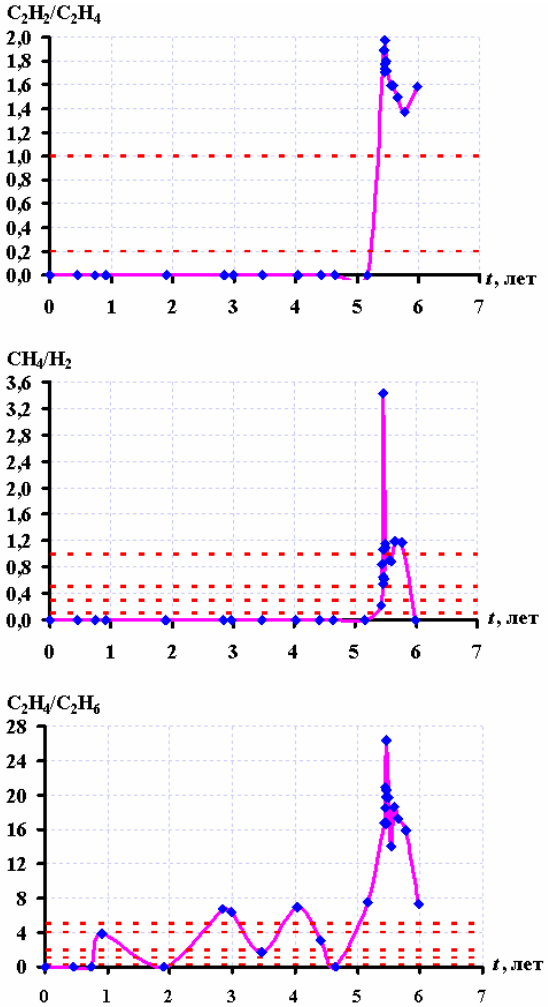
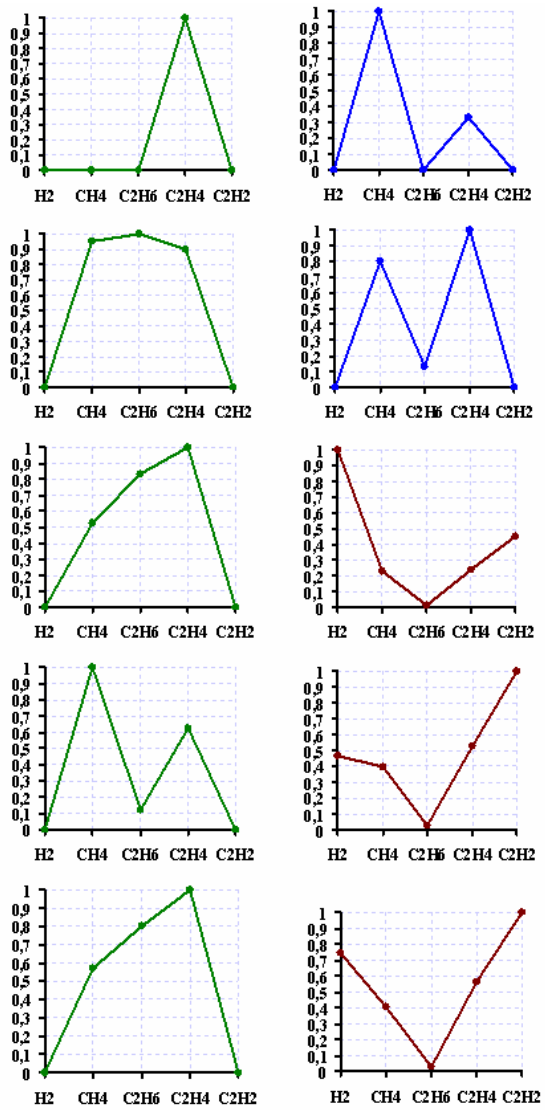


Рисунок 4. Динамика изменения отношений пар газов для трансформатора ТДТН-31,5/110/35/6

Как видно из рис. 5 *а* количество одинаковых образов, построенных по результатам соседних испытаний ничтожно мало. В большинстве проб, газами с максимальной концентрацией является метан и этилен. Количество проб, в которых газами с максимальной концентрацией являются водород, этан и ацетилен, намного меньше. Такая же тенденция характерна и для первых проб масла из трансформатора ТДТН-31,5/110/35/6, т.е., которые построены по результатам АРГ непосредственно до воздействия тока короткого замыкания (рис. 5 *б*). Однако, сразу же после динамического воздействия токов короткого замыкания содержание газов на протяжении оставшихся измерений, практически не изменяется и соответствует дуговому разряду, согласно [4].

Для количественной оценки динамики изменения процентного содержания газов предлагается использовать подход, основанный на метрических методах распознавания [24, 22], в частности использовать значение диагностического расстояния между координатами соседних образов.

В общем виде выражение для расчета диагностического расстояния может быть представлено как:



а *б*

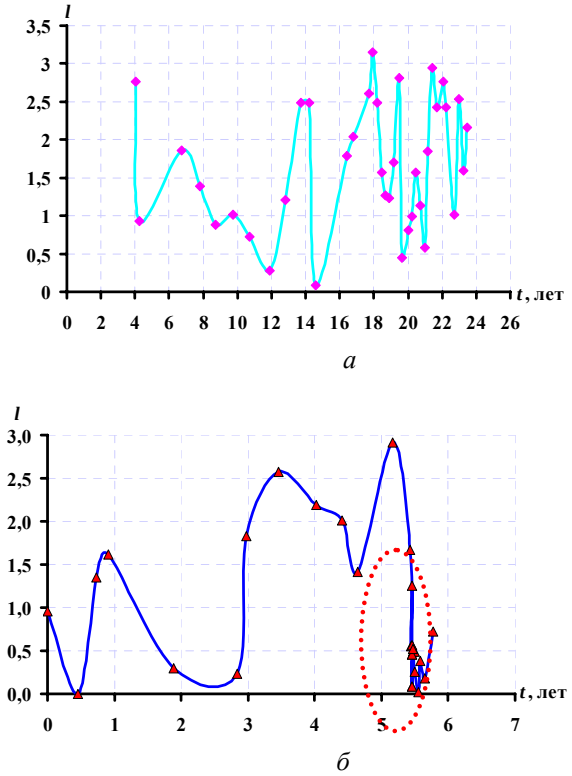
а – трансформатор ТДНГ-31,5/110/35/6;
б – трансформатор ТДТН-31,5/110/35/6;

Рисунок 5. Динамика изменения графических образов, в трансформаторах ТДНГ-31,5/110/35/6 и ТДТН-31,5/110/35/6

$$l_i = \left(\left| H_{2_i}^* - H_2 \right|^v + \left| CH_{4_i}^* - CH_4 \right|^v + \left| C_2H_{6_i}^* - C_2H_6 \right|^v + \right.$$
$$+ \left| C_2H_{4_i}^* - C_2H_4 \right|^v + \qquad (4)$$
$$\left. + \left| C_2H_{2_i}^* - C_2H_2 \right|^v \right)^{\frac{1}{v}},$$

где: $H_{2_i}^*, CH_{4_i}^*, C_2H_{6_i}^*, C_2H_{4_i}^*, C_2H_{2_i}^*$ – координаты графических образов (отношения значений концентраций каждого из газов к газу с максимальной концентрацией), полученные по результатам предыдущего измерения; v – мера расстояния (v=2). $H_{2_{i+1}}, CH_{4_{i+1}}, C_2H_{6_{i+1}}, C_2H_{4_{i+1}}, C_2H_{2_{i+1}}$ – координаты графических образов, полученные по результатам последующего измерения;

Очевидно, что чем больше отличаются графические образы, тем большие значения принимает диагностическое расстояние, тем более случайным является характер их изменения во времени. Зависимости диагностического расстояния, между графическими образами, построенными по результатам соседних измерений, в трансформаторах ТДНГ-31,5,110/35/6 и ТДТН-31,5/110/35/6 от продолжительности эксплуатации приведены на рис. 6.



а – диагностическое расстояние между графическими образами в трансформаторе ТДНГ-31,5,110/35/6;
б – диагностическое расстояние между графическими образами в трансформаторе ТДТН-31,5/110/35/6;

Рисунок 6. Зависимость диагностического расстояния, между графическими образами в трансформаторах ТДНГ-31,5,110/35/6 и ТДТН-31,5/110/35/6 от продолжительности эксплуатации

Анализируя приведенные зависимости можно легко увидеть, что в нормально работающих бездефектных трансформаторах значения диагностических расстояний между графическими образами (рис. 6 *а*) изменяются случайным образом, и существенно разняться между собой. Количество минимальных значений l крайне мало, по сравнению с остальными, и самое главное, что минимальные значения не повторяются для повторных наблюдений. После воздействия тока короткого замыкания, на протяжении 7 измерений (рис. 6 *б* выделенная область) диагностические расстояния принимают минимальные значения.

Выполненные исследования показали, что в нормально работающих исправных трансформаторах, значения всех без исключения диагностических признаков, используемых для интерпретации результатов АРГ, изменяются случайным образом. Аварийные воздействия со стороны электрической сети, приводят к кратковременному появлению систематической составляющей в зависимостях концентраций и скоростей нарастания газов от продолжительности эксплуатации, и к кратковременной стабилизации значений отношений пар газов на уровне соответствующему данному энергетическому воздействию, а также к схожести графических образов. Сравнивая полученные результаты, с результатами аналогичных исследований, для трансформаторов с развивающимися дефектами [22], следует констатировать, что характер изменения диагностических критериев от длительности эксплуатации изменяется в зависимости от состояния трансформаторов. Учитывая [22], что такие изменения имеют место еще до того момента как концентрации газов в дефектном оборудовании превысят граничные значения оценка динамики изменения данных критериев позволяет выявлять развивающиеся дефекты на ранней стадии.

V. ВЫВОДЫ

В данной статье впервые выполнен комплексный анализ динамики изменения диагностических критериев, используемых для интерпретации результатов АРГ, во времени, для исправных трансформаторов. При этом, кроме нормально работающих трансформаторов анализировались и трансформаторы, которые подверглись аварийным воздействиям со стороны электрической сети. В результате выполненных исследований установлено:

1. При отсутствии дефекта в высоковольтных силовых трансформаторах негерметичного исполнения зависимости концентраций газов, скоростей нарастания газов, отношений пар газов носят случайный стохастический характер. Также случайно изменяются и графические образы, построенные по результатам АРГ, бездефектного оборудования. Случайный характер изменения во времени, диагностических критериев используемых для интерпретации результатов хроматографического анализа растворенных в масле газов, в нормально работающих исправных трансформаторах, обусловлен как процессами диффузии газов из масла в атмосферу, так и особенностями газообразования в присутствии свободного кислорода.

2. При аварийных воздействиях со стороны сети в зависимостях концентраций газов и скоростей их нарастания от длительности эксплуатации наблюдается кратковременное преобладание систематической компоненты над случайной составляющей. При этом значения отношений пар газов временно стабилизируются в области характерной для данного уровня энергетического воздействия, которое является следствием, данного аварийного режима. Также наблюдается кратковременная стабилизация графических образов дефектов, при которой полученные образы совпадают с образами дефектов, характерных для данного уровня энергетического воздействия.

3. С учетом выполненных ранее исследований, можно утверждать, что динамика изменения диагностических критериев, используемых для интерпретации результатов АРГ, *в исправных и дефектных трансформаторах, существенно различается*. Что позволяет выявлять развивающиеся дефекты на ранней стадии их развития еще до того момента как концентрации газов превысят граничные значения, а также распознавать рост концентраций газов, вызванный аварийными режимами работы электрических сетей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1]. IEC Publication 60599, Interpretation of the analysis of gases in transformer and other oil med electrical equipment in &, Geneva, Switzerland, 1999.

[2]. IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers, IEEE StandARCd C57.104-2008, Feb.2009.

[3]. Dornenburg E., and Strittmater W. Monitoring Oil Cooling Transformers by Gas Analysis/ E. Dornenburg, W. Strittmater // Brown Boveri Review, vol. 61, pp. 238-274, 1974.

[4]. СОУ-Н ЕЕ 46.501:2006: Діагностика маслонаповненого трансформаторного обладнання за результатами хроматографічного аналізу вільних газів, відібраних із газового реле, і газів, розчинених у ізоляційному маслі .– Київ. – 2007.

[5]. РД 153-34.0-46.302-00: Методические указания по диагностике развивающихся дефектов трансформаторного оборудования по результатам хроматографического анализа газов, растворенных в масле. – Офиц. изд. М.: НЦ ЭНАС, 2001;

[6]. Давиденко И.В. Определение допустимых значений контролируемых параметров маслонаполненного оборудования на основе массива наблюдаемых данных /И.В Давиденко // Электричество. – 2009. – № 6.–С. 81–82.

[7]. Давиденко И.В. Критерии оценки технического состояния маслонаполненных вводов и измерительных трансформаторов по скорости роста концентраций растворенных газов. Сб. докладов научно-практической конференции специалистов Сибири и Востока “Диагностика электрических установок”. Новосибирск: ГЦРО. –2009.– С.57-68.

[8]. Шутенко О.В. Определение значений граничных концентраций растворенных в масле газов методом минимального риска /О.В. Шутенко // Электричество – Москва. – 2017. – № 8. – С. 50–60 DOI: 10.24160/0013-5380-2017-8-50-60.

[9]. Абрамов В.Б. Особенности контроля маслонаполненного электрооборудования по результатам хроматографического анализа растворенных в масле газов / В.Б. Абрамов // Электрические сети и системы. – 2012. – №4. – С. 77–79.

[10]. Давиденко И.В. Новые способы идентификация вида дефектов маслонаполненных вводов /И.В Давиденко // Известия высших учебных заведений. Проблемы Энергетики.–2009. – № 1-2. С. – 130–134.

[11]. Duval M., Lamarre L. 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. – Issue 6. – pp. 9-12 doi: 10.1109/MEI.2014.6943428.

[12]. Ahmed M.R., Geliel M.A., Khalil A. Power transformer fault diagnosis using fuzzy logic technique based on dissolved gas analysis / M.R. Ahmed, M.A. Geliel, A.Khalil //Control & Automation (MED), 2013 21st Mediterranean Conference on. – IEEE, 2013. – pp. 584-589 DOI: 10.1109/MED.2013.6608781.

[13]. Dhote N.K., Helonde J.B. Diagnosis of power transformer faults based on five fuzzy ratio method / N.K. Dhote, J.B. Helonde //WSEAS Transaction on Power System – 2012. – Issue 3. – no.3. – pp. 114-125 DOI: 10.1109/IPEC.2005.206897.

[14]. Chih-Hsuan Liu, Tung-Bin Lin, Shun-Yuan Wang. Integrated power transformer diagnosis using hybrid fuzzy dissolved gas analysis /Liu Chih-Hsuan, Lin Tung-Bin, Wang Shun-Yuan // IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering. – 2015. – Vol. 10. – №.6. – pp. 689-698. DOI: 10.1002/tee.22148.

[15]. Siddique M.A.A., Mehfuz S. Artificial neural networks based incipient fault diagnosis for power transformers /M.A.A. Siddique, S. Mehfuz //India Conference (INDICON), 2015 Annual IEEE. – IEEE, 2015. – pp. 1-6. DOI: 10.1109/indicon.2015.7443174.

[16]. Liu C.H., Yao L.T., Lin, T.B., Wang, S.Y. Innovated Fault Diagnosis for Power Transformer Using Hybrid Fuzzy Dissolved Gas Analysis / C.H. Liu, L.T. Yao, T.B. Lin, S.Y. Wang, //Applied Mechanics and Materials. – 2013. – Vols. 284-287. – pp. 1082-1086. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.284-287.1082.

[17]. Бондаренко В.Е., Шутенко О.В. Разработка нечеткой нейронной сети для интерпретации результатов анализа растворенных в масле газов / В.Е. Бондаренко, О.В. Шутенко // Електротехніка і Електромеханіка. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2017. –№2. – С. 49–56 DOI: 10.20998/2074-272X.2017.2.08.

[18]. Lindgren S.R. Transformer condition assessment experiences using automated on-line dissolved gas analysis. /S.R. Lindgren // CIGRE Reports, A2-202.

[19]. Sparling, Brian D., and Jacques Aubin. Power transformer life extension through better monitoring. // Proc. PowerGrid Europe, Spain, 2007.

[20]. Шутенко О.В. Метод обнаружения развивающихся дефектов высоковольтных трансформаторов по результатам хроматографического анализа растворенных в масле газов /О.В. Шутенко // Электрические сети и системы – Київ.–2010– № 3. – С. 38–45.

[21]. Шутенко О.В., Абрамов В.*Б.* Оценка влияния длительности эксплуатации на значения концентраций газов в негерметичных трансформаторах / О.В. Шутенко, В.Б. Абрамов // "Электро" Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность – 2017. – № 2. – С. 36–45.

[22]. Шутенко О.В. Особенности динамики изменения критериев используемых для интерпретации результатов АРГ в силовых трансформаторах с разными типами дефектов // О.В. Шутенко / Новое в Российской электроэнергетике – Москва. – 2017. – № 9. – С. 30-49.

[23]. Джонсон Н. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке / Н. Джонсон, Ф. Лион. – М.: Мир, 1981. – 520 с.

[24]. Биргер И.А. Техническая диагностика /И.А. Биргер – М.:. Машиностроение. – 1978. – 240 с.

[25]. Боярчуков Г.М. Практические проблемы оценки состояния высоковольтного оборудования по содержанию газов в трансформаторном масле /Г.М. Боярчуков // Новини енергетики. – 2010. – № 7. – С. 23–33.

[26]. Малюшевська А. П. Дослідження впливу підвищених температур на експлуатаційні властивості трансформаторного масла Т-1500 в плівкових ізоляційних системах/ А. П. Малюшевська, С. О. Топоров, А. Я. Дмитрішин // Електротехніка та електроенергетика. – 2015. – №1. – С. 21–25. DOI: 10.15588/1607-6761-2015-1-4

Стаття надійшла до редакції 15.10.2017

АНАЛІЗ ДИНАМІКИ ЗМІНИ КРИТЕРІЇВ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ ДЛЯ ІНТЕРПРЕТАЦІЇ РЕЗУЛЬТАТІВ АРГ, У СПРАВНИХ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ТРАНСФОРМАТОРАХ НЕГЕРМЕТИЧНОГО ВИКОНАННЯ

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

Мета роботи. *Дослідити характер динаміки зміни критеріїв що використовуються для інтерпретації ре-*

зультатів АРГ, в справних високовольтних трансформаторах, негерметичного виконання.

Методи дослідження. *Теорія часових рядів, регресійний аналіз, теорія розпізнавання образів, метод контрольних рівнів, метричні методи розпізнавання, діагностика по відстані до еталону.*

Отримані результати. *За результатами досліджень встановлено, що в нормально працюючих справних трансформаторах, значення всіх без винятку діагностичних ознак, які використовуються для інтерпретації результатів АРГ, змінюються випадковим чином. Аварійні впливу з боку електричної мережі, призводять до короткочасного появи систематичної складової в залежності концентрацій і швидкостей наростання газів від тривалості експлуатації, і до короткочасної стабілізації значень відношень пар газів на рівні, що відповідає даному енергетичного впливу, а також до схожості графічних образів.*

Наукова новизна. *Виконаний аналіз показав, що в трансформаторах негерметичного виконання виникнення і розвиток дефекту супроводжується не тільки зміною чисельних значень діагностичних критеріїв, що відомо і використовується при діагностиці, а й до істотної зміни характеру залежностей діагностичних критеріїв від часу.*

Практична цінність. *Отримані результати дають можливість виявлення дефектів, що розвиваються в негерметичних трансформаторах, на ранній стадії їх розвитку, ще до того як значення концентрацій газів перевищать граничні значення, що дозволить уникнути руйнування ізоляції, а також виявляти зростання концентрацій розчинених в маслі газів, що обумовлені впливом аварійних режимів роботи електричних мереж.*

Ключові слова: *аналіз розчинених у маслі газів, концентрації газів, швидкості наростання, відношення газів, графічні образи, динаміка зміни, регресійний аналіз, контрольні рівні, діагностична відстань.*

THE ANALYSIS OF THE DYNAMICS OF CHANGE OF CRITERIA USED FOR INTERPRETATION OF DGA RESULTS, IN CORRECT HIGH-VOLTAGE TRANSFORMERS OF NON-GERMETIC EXECUTION

SHUTENKO O. V. Ph.D, Associate professor, Associate professor of the department of «Electric power transmission» of the National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute, Ukraine, *e-mail: o.v.shutenko@gmail.com;*

Purpose. *Investigate the nature of the dynamics of changes in the criteria used for interpreting the results of DGA, in serviceable high-voltage transformers, leaky performance.*

Methodology. *Theory of time series, regression analysis, the theory of pattern recognition, the method of reference levels, metric methods of recognition, diagnostics by distance to the standard.*

Findings. *According to the results of the research, it is established that in normal functioning transformers, the values of all the diagnostic features used to interpret DGA results are changed randomly. Emergency actions on the part of the power grid lead to a short-term occurrence of a systematic component in the dependencies of the concentrations and rates of gas build-up on the duration of operation, and to a short-term stabilization of the values of the gas ratios at the level corresponding to this energy impact, as well as to the similarity of the graphic images.*

Originality. *The performed analysis showed that in transformers of leaky performance, the appearance and development of a defect is accompanied not only by a change in the numerical values of the diagnostic criteria, which is known and used in the diagnosis, but also to a significant change in the nature of the dependencies of the diagnostic criteria versus time.*

Practical value. *The obtained results make it possible to detect developing defects in transformers of non-germetic execution at an early stage of their development, even before the values of gas concentrations exceed the boundary values, which will help to avoid the destruction of insulation, and also to recognize the growth of concentrations of gases dissolved in oil, caused by the influence of emergency operation of electrical networks.*

Keywords: *5 dissolved gas analysis, concentration of gases, slew rate, gas ratio, graphic images, dynamics of change, regression analysis, control levels, diagnostic distance.*

REFERENCES

[1]. IEC Publication 60599, Interpretation of the analysis of gases in transformer and other oil med electrical equipment in &, Geneva, Switzerland, 1999.

[2]. IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers, IEEE StandARCd C57.104-2008, Feb.2009.

[3]. Dornenburg, E., Strittmater, W. (1974). Monitoring Oil Cooling Transformers by Gas Analysis, *Brown Boveri Review*, 61, 238-274.

[4]. SOU-N EE 46.501: Diagnostika maslonapovnenogo transformatornogo obladnannja za rezul'tatami hromatografichnogo analizu vil'nih gaziv, vidibranih iz gazovogo rele, i gaziv, rozchinenih ui zoljacijnomu masli [SOU-N EE 46.501: Diagnosis oil-filled transformer equipment based on the results of chromatographic analysis of free gas with gas relay selected, i gases dissolved in insulating oil]. Kiïv, 2007, 92 p. (in Ukrainian).

[5]. RD 153-34.0-46.302-00: Metodicheskie ukazanija po diagnostike razvivajushhihsja defektov transformatornogo oborudovanija po rezul'tatam hromatograficheskogo analiza gazov, rastvorennyh v masle. [RD 153-34.0-46.302-00: Guidelines for the diagnosis of developing defects in transformer equipment

based on the results of the chromatographic analysis of gases dissolved in oil]. Moskva: NC JeNAS, 2001, 28 p. (in Russian).

[6]. Davidenko I.V. (2009). Opredelenie dopustimyh znachenij kontroliruemyh parametrov maslonapolnennogo oborudovanija na osnove massiva nabljudaemyh dannyh [Determination of admissible values of controlled parameters of oil-filled equipment on the basis of an array of observable data]. *Jelektrichestvo,* 6, 81–82. (in Russian).

[7]. Davidenko I.V. (2009) Kriterii ocenki tehnicheskogo sostojanija maslonapolnennyh vvodov i izmeritel'nyh transformatorov po skorosti rosta koncentracij rastvorennyh gazov. [Criteria for assessing the technical condition of oil-filled bushings and measuring transformers in terms of the growth rate of concentrations of dissolved gases]. *Sb. dokladov nauchno-prakticheskoj konferencii specialistov Sibiri i Vostoka "Diagnostika jelektricheskih ustanovok". Novosibirsk*: *GCRO*, 57-68. (in Russian).

[8]. Shutenko O.V. (2017). Opredelenie znachenij granichnyh koncentracij rastvorennyh v masle gazov metodom minimal'nogo riska [Determination of the values of the boundary concentrations of gases dissolved in oil by the minimum risk method]. *Jelektrichestvo,* 8, 50–60 (in Russian) DOI: 10.2 4160 /0013-5380-2017-8-50-60

[9]. Abramov V.B. (2012). Osobennosti kontrolja maslonapolnennogo oborudovanija po rezul'tatam hromatograficheskogo analiza rastvorennyh v masle gazov. [Features of the control of oil-filled equipment based on the results of chromatographic analysis of gases dissolved in oil]. *Jelektricheskie seti i sistemy,* 4, 77–79. (in Russian).

[10]. Davidenko I.V. (2009) Novye sposoby identifikacija vida defektov maslonapolnennyh vvodov [New ways to identify the type of defects of oil-filled bushings]. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Problemy Jenergetiki*, 1-2, 130–134. (in Russian).

[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. DOI: 10.1109/MEI.2014.6943428.

[12]. Ahmed M.R., Geliel M.A., Khalil A. (2013) Power transformer fault diagnosis using fuzzy logic technique based on dissolved gas analysis. *Control & Automation (MED), 21st Mediterranean Conference on IEEE*, 584-589. DOI: 10.1109/MED. 2013.6608781.

[13]. Dhote N.K., Helonde J.B. (2012). Diagnosis of power transformer faults based on five fuzzy ratio method. *WSEAS Transaction on Power System*, 3, 3, 114-125. doi: http: // 10.1109/IPEC.2005.206897.

[14]. Liu, C.H., Lin, T.B., Wang, S.Y. (2015). Integrated power transformer diagnosis using hybrid fuzzy dissolved gas analysis. *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 10, 6, 689-698. DOI: 10.1002/tee.22148.

[15]. Siddique M.A.A., Mehfuz S. (2015). Artificial neural networks based incipient fault diagnosis for power transformers. *India Conference (INDICON)*, 2015 Annual IEEE, IEEE, 1-6. DOI: 10.1109/indicon.2015.7443174.

[16]. Liu C.H., Yao L.T., Lin, T.B., & Wang, S.Y. (2013). Innovated Fault Diagnosis for Power Transformer Using Hybrid Fuzzy Dissolved Gas Analysis. *Applied Mechanics and Materials*, 284-287, 1082-1086. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.284-287.1082.

[17]. Bondarenko V.E., Shutenko O.V. (2017). Razrabotka nechetkoj nejronnoj seti dlja interpretacii rezul'tatov analiza rastvorennyh v masle gazov [Development of fuzzy neural network for interpretation of analysis results of dissolved gases in oil]. *Elektrotehnika i Elektromehanika*, 2, 49–56. (in Russian). DOI: 10.20998/2074-272X.2017.2.08.

[18]. Lindgren S.R. Transformer condition assessment experiences using automated on-line dissolved gas analysis. /S.R. Lindgren // CIGRE Reports, A2-202.

[19]. Sparling, B.D., Jacques, A. (2007) Power transformer life extension through better monitoring. // Proc. PowerGrid Europe, Spain.

[20]. Shutenko O.V. (2010). Metod obnaruzhenija razvivajushhihsja defektov vysokovol'tnyh transformatorov po rezul'tatam hromatograficheskogo analiza rastvorennyh v masle gazov [The method for detecting developing defects of high-voltage transformers based on the results of chromatographic analysis of gases dissolved in oil]. *Jelektricheskie seti i sistemy*, 3. 38–45. (in Russian).

[21]. Shutenko O.V., Abramov V.B. (2017) Ocenka vlijanija dlitel'nosti jekspluatacii na znachenija koncentracij gazov v negermetichnyh transformatorah [Estimation of the influence of operating time on the values of gas concentrations in transformers of non-germetic execution]. *Jelektro. Jelektrotehnika, jelektrojenergetika, jelektrotehnicheskaja promyshlennost,* 2, 36–45. (in Russian).

[22]. Shutenko O.V. (2017). Osobennosti dinamiki izmenenija kriteriev ispol'zuemyh dlja interpretacii rezul't-atov ARG v silovyh transformatorah s raznymi tipami defektov [Features of dynamics of change of criteria used for interpretation of DGA results in power transformers with different types of defects]. *Novoe v Rossijskoj jelektrojenergetike*, 9, 30-49. (in Russian).

[23]. Dzhonson N. (1981). Statistika i planirovanie jeksperimenta v tehnike i nauke.M. Mir, 520.

[24]. Birger I.A. (1978). Tehnicheskaja diagnostika. M. Mashinostroenie, 240.

[25]. Bojarchukov G.M. [2010]. Prakticheskie problemy ocenki sostojanija vysokovol'tnogo oboru-dovanija po soderzhaniju gazov v transformatornom masle. [Practical problems in assessing the state of high-voltage equipment for the gas content in transformer oil]. *Novini energetiki,* 7, 23–33. (in Russian).

[26]. Malyushevska, A., Dmitrishin, A., & Toporov, S. (2015). Research of influence of heightened temperatures on the operational characteristics of transformer oil t-1500 in film insulation systems. Electrical Engineering And Power Engineering, 1, 21-25. DOI: 10.15588/1607-6761-2015-1-4

УДК 621.548

УПРАВЛІННЯ ГАЗОПОВІТРЯНОЮ ЕНЕРГЕТИЧНОЮ УСТАНОВКОЮ ПРОМИСЛОВОГО ПІДПРИЄМСТВА

ЛОБОВ В.Й. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри автоматизації, комп'ютерних наук та технологій, Криворізький національний університет, Кривий Ріг, Україна, *e-mail: lobovvjcheslav@gmail.com*;

ЛОБОВА К.В. студентка кафедри автоматизації, комп'ютерних наук та технологій, Криворізький національний університет, Кривий Ріг, Україна, *e-mail: karinalobova409@gmail.com*;

ДАЦЬ А.В. студент кафедри автоматизації, комп'ютерних наук та технологій, Криворізький національний університет, Кривий Ріг, Україна, *e-mail: dats1996@yandex.ru*;

Мета роботи. *Обґрунтувати питання ефективного використання кінетичної енергії відпрацьованих технологічною установкою газоповітряних потоків для вироблення електричної енергії, що дозволить розробити новий алгоритм управління і створити нове програмне забезпечення до управління газоповітряною енергетичною установкою. Для перевірки на адекватність розроблених алгоритмів управління і програмного забезпечення розробити лабораторну газоповітряну енергетичну установку.*

Методи дослідження. *Для дослідження розподілу газоповітряних мас у технологічних установках промислового підприємства використаний метод імітаційного моделювання, виконаний в програмному середовищі SolidWorks Flow Simulation. Метод імітаційного моделювання дозволив розробити новий алгоритм управління і створити нове програмне забезпечення з урахуванням основних технічних вимог, що пред'являються до управління газоповітряною енергетичною установкою. Для перевірки працездатності розроблених алгоритмів і програмного забезпечення управління газоповітряною енергетичною установкою використаний метод фізичного моделювання, яке проведено на розробленій лабораторній установці, з'єднаної через інтерфейс USB з ЕОМ, що має віртуальну модель SCADA системи, представлену в середовищі LabVIEW.*

Отримані результати. *На основі моделювання газоповітряних потоків на розробленій математичній моделі оптимально вибрані співвідношення розмірів трубопроводу, раціонально визначено витрати газоповітряної суміші, необхідної для найбільш ефективної роботи газоповітряної енергетичної установки, тобто у робочій зоні газоповітряного тракту гвинт генератора контактує з найбільш значними потоками, забезпечуючи максимальний ефект обертання. Розроблені основні технічні вимоги, що пред'являються до управління газоповітряною енергетичною установкою. Розроблено оптимальний алгоритм управління, який дозволив впровадити його в схему управління газоповітряної енергетичної установки з мікропроцесором або спеціалізованим мікроконтролером.*

Наукова новизна. *Знайдені нові можливості подальшого удосконалення відомих базових математичних моделей кінетики газоповітряних потоків і запропоновані варіанти адаптації в області газодинаміки для оцінки витрат газоповітряних потоків при роботі вентиляторної установки на трубопровід. Розроблена структурна схема та алгоритми управління газоповітряною енергетичною установкою, до якої входять вентилятор, генератор, трубопровід і блок управління, виконаний на основі використання мікроконтролера Arduino Uno. Розроблено також алгоритм підпрограми для з'єднання газоповітряної енергетичної установки з SCADA системою.*

Практична цінність. *Запропонований спосіб вироблення електричної енергії газоповітряною енергетичною установкою з мікропроцесорною системою управління, як показали розрахунки, підтверджені експериментальними дослідженнями на лабораторній установці, дозволяє зменшити до 20% кількості витраченої електроенергії технологічною установкою та може бути використаний в промислових умовах. Впровадження газоповітряних енергетичних установок із мікропроцесорною системою і SCADA системою дозволить підвищити енергоефективність роботи технологічних установок.*

Ключові слова: *технологічна установка; газоповітряні потоки; електрична енергія; управління; мікроконтролер; алгоритми.*

I. ВСТУП

Використання потужності вітру для виробленої електроенергії з кожним роком зростає, що не менше як на 7% [1]. За останні кілька років вітроенергетика отримала значну увагу, як один з найбільш перспективних джерел для отримання електричної енергії [2], [3]. Частка у загальному споживанні електроенергії виробленою вітром в європейських країнах, перевищила 9%, в США та Австралії досягла 4%, а в Китаї - 2% [4]. Безперервне збільшення використання енергії вітру призвело до розвитку нових технологій отримання електричної енергії.

Вирішення цієї задачі можливо за рахунок впровадження технічних заходів, спрямованих на стимулювання зниження витрат електроенергії в технологічних установках, якими можуть бути газовий котел, димосос, котлоагрегат, шахтний вентилятор, тощо.

Зниження споживання електроенергії з централі-

© Лобов В.Й., Лобова К.В., Даць А.В., 2017
DOI 10.15588/1607-6761-2017-2-9

зованої мережі може бути досягнуто за рахунок вироблення і споживання альтернативної енергії, яка отримується шляхом використання відпрацьованих газоповітряних потоків промислових установок. Очікуваний ефект від зниження спожитої електричної енергії можливо досягнути за умови використання та впровадження газоповітряної енергетичної установки (ГПЕУ), яка працює одночасно з технологічною установкою, що постійно формують чітко направлений газоповітряний потік з його сталими параметрами, який є відпрацьованим і використовується ГПЕУ.

В основі роботи ГПЕУ вирішується задача використання потоку маси газів/повітря, відпрацьованих, вивільнених або видуваємих технологічною установкою, керованою системою управління, що живиться від електричної мережі, та перетворення кінетичної енергії потоку цих мас у електричну. Сучасні системи управління ГПЕУ потребують проведення дослідження, відповідно з науковими і практичними задачами, та обґрунтування необхідності реалізації на сучасній елементній базі з використанням силових напівпровідникових елементів, мікроконтролерів, мікросхем середньої ступені інтеграції та великих інтегральних схем. Доцільність розробки ГПЕУ з сучасними системами управління відповідає енергетичній стратегії України на період до 2030 року [5] і необхідно для розвитку відповідної області науки та впровадження таких систем у виробництво. Тому тема статті є актуальною і має наукове і практичне значення.

Для ефективного моделювання розподілу газоповітряних потоків у технологічному тракті використовують універсальний модуль SolidWorks Flow Simulation, призначений для аналізу гідро газодинаміки і теплопередачі, який заснований на методі кінцевих елементів [6]. Програмне середовище SolidWorks Flow Simulation найбільш задовольняє виконанню поставленої задачі, оскільки рух газоповітряного потоку моделюється за допомогою рівняння Нав'є-Стокса, а теплообмін рівнянням Фур'є, які описують у нестаціонарній постановці закони збереження маси, імпульсу і енергії цього середовища. Крім того, використовуються рівняння стану компонентів потоку, а також емпіричні залежності в'язкості та теплопровідності компонентів середовища від температури. Для моделювання турбулентних течій згадані рівняння Нав'є-Стокса усереднюють по Рейнольдсу, тобто використовується середнє по малому масштабу часу вплив турбулентності на параметри потоку, а великомасштабні тимчасові зміни усереднених по малому масштабі часу складових газодинамічних параметрів потоку (тиску, швидкостей, температури) враховуються введенням відповідних похідних за часом.

II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Використання кінетичної енергії вітру в вітроенергетичних установках залежить від швидкості вітрового потоку, так й енергія, яку можна отримати, змінюється протягом доби, так і впродовж місяця і сезону року [7] – [9], тому мають низку ефективність. Одночасно відмічається розвиток вітроенергетичних установок малої та надмалої потужності [10] – [11]. Сучасні дослідження направлені на підвищення ефективності [12] – [15] і удосконалення конструкцій та систем управління вітрових енергетичних установок [16] – [18]. Вітроенергетичні установки становлять дуже складну електромеханічну систему, та системи керування ними потребують удосконалення [19] – [21]. Відомий пристрій для автоматичного керування електроспоживанням, який має первинні датчики витрати електроенергії, блок прийому інформації, який підключений до мікроконтролера, та датчиків і блоки прийому інформації від лічильників технічного і комерційного обліку, виходи з яких підключені до мікроконтролера, а вихід з мікроконтролера підключений до блока керування споживачами регуляторами [22]. Недоліком такого пристрою є те, що споживачі-регулятори весь час споживають із мережі електричну енергію, яка не економиться. Існують інші способи і пристрої для автоматичного керування електроспоживанням, який має технологічну установку, що складається із каналу для газового/повітряного потоку, всередині якого встановлений повітряний гвинт, мікроконтролера, комутаторів, датчиків тиску газового/повітряного потоку та перетворювач електродвигуна вентилятора, блока управління технологічною установкою [23] – [25]. Проте, робота газоповітряної енергетичної установки залежить від наявності потрібного стабільного потоку у трубопроводі, що не дає змоги використовувати енергію увесь час.

III. МЕТА РОБОТИ

Обґрунтувати питання ефективного використання кінетичної енергії відпрацьованих технологічною установкою газоповітряних потоків при вироблені електричної енергії. Для моделювання розподілу газоповітряних потоків у технологічному тракті розробити математичну модель і дослідження використати універсальний модуль SolidWorks Flow Simulation, який призначений для аналізу гідро газодинаміки і теплопередачі.

При вирішенні поставленого завдання необхідно виходити з того, що отримані результати дослідження переміщення газоповітряних потоків у технологічному тракті технологічної установки промислового підприємства у програмному середовищі SolidWorks Flow Simulation дозволить визначити шляхи досягнення максимальної енергоефективності газоповітряних потоків, з'ясувати основні технічні вимоги, що пред'являються до управління ГПЕУ і розробити оптимальний алгоритм управління, який повинен впроваджуватися в схему управління ГПЕУ з мікропроцесором або спеціалізованим мікроконтролером і забезпечити зв'язок зі SCADA системою.

Для перевірки результатів моделювання і працездатності, розроблених алгоритмів і програмного забезпечення управління ГПЕУ використати метод фізичного моделювання, для проведення якого розробити і виготувати лабораторну установку, з'єднати її

через інтерфейс USB з ЕОМ, що повинна мати віртуальну модель SCADA системи, представлену в середовищі LabVIEW.

IV. ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ І АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

При роботі виробничої установки через технологічний тракт нагнітається або видувається газоповітряний потік гвинтом дуттьового вентилятора, який працює на трубопровід або зовні. Вентилятор входить до складу електроприводу, який має електродвигун постійного струму, але може мати електродвигун змінного струму. Зовні трубопроводу в технологічному тракті розташований другий гвинт кінетично пов'язаний з генератором. Кінетична енергія газоповітряного потоку виробничої установки використовується для механічного обертання гвинта, кінематично пов'язаний з генератором, який виробляє електричну енергію. Технологічний тракт і структурна схема системи управління ГПЕУ, представлені на рис. 1. До складу технологічного тракту входять: трубопровід для відводу повітря і газу, електропривод із вентилятором, гвинт із генератором. До схеми системи управління ГПЕУ входять: мікроконтролер, датчики, акумулятор, комутатори, пульт керування і вузол підключення до комп'ютера Роботою ГПЕУ управляє мікроконтролер за сигналами з датчиків: обертів, струму, напруги, температури електродвигуна вентилятору, обертів і напруги генератора та датчика заряду акумулятора.

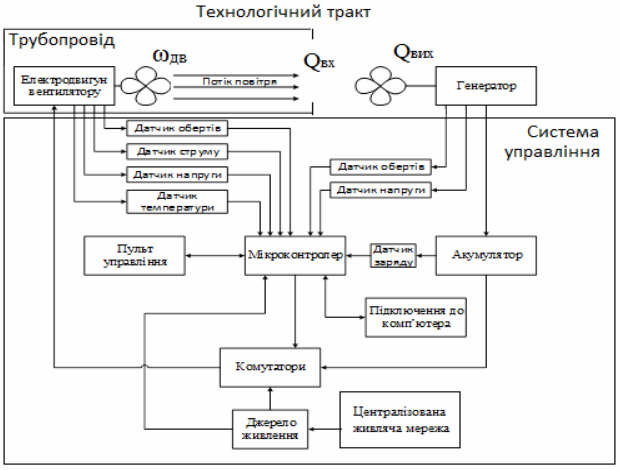


Рисунок 1. Технологічний тракт і структурна схема системи управління ГПЕУ

При наявності газоповітряного потоку генератор постійного струму використовується для зарядки акумулятора. Для управління перемиканням режиму роботи установки, тобто роботи електродвигуна вентилятора від централізованої живлячої мережі або від акумулятора, при достатньому рівні її заряду, використовується комутатор. Мікроконтролер управляє роботою комутатора за сигналами датчика напруги на виводах акумулятора. При цьому переключення не впливають на роботу виробничої установки. При знижені напруги на акумуляторі нижче заданого рівня виконуються зворотні дії – живлення електродвигуна постійного стуму вентилятора виконується від централізованої живлячої мережі. Мікроконтролер виконує збір інформації про стан роботи електродвигуна вентилятора і генератора за допомогою датчиків обертів, струму, напруги, і передає цю інформацію на ЕОМ. Використання такої взаємодії обумовлене необхідністю керувати ГПЕУ безпосередньо через мікроконтролер із використанням SCADA системи, програма якої знаходиться на ЕОМ та реалізується з використанням програмного забезпечення Labview.

Для ручного управління ГПЕУ використовується пульт управління. Його функціональні можливості менші, порівняно з використанням SCADA системи, але він забезпечує виконання основних функцій типу: старт/стоп, переключення режимів роботи, а також відображає статус роботи ГПЕУ і попереджувальні сигнали.

Для визначення ефективного використання кінетичної енергії відпрацьованих технологічною установкою газоповітряних потоків для вироблення електричної енергії розробимо математичну модель. Для цього виведемо диференціальні рівняння об'єкта, технологічний тракт якого зображений на рис. 1. Позначимо змінні (керуючі величини): швидкість обертання дуттьового вентилятора через $\omega_{дв}$, а швидкість обертання гвинта генератора - $\omega_{гт}$, і вихідні змінні (регульовані величини): витрати газоповітряного потоку відповідно до - $Q_{вх}$ і після $Q_{вих}$ гвинта генератора.

Запишемо фізичні рівняння, що характеризують процеси газоповітряного тракту через закон збереження маси:

$$\frac{dm}{dt} = Q_{вх} - Q_{вих} \tag{1}$$

Різниця між речовинами на вході та виході акумулюється в робочому полі розташування гвинта генератора.

Рівняння стану, як відомо з курсів термодинаміки, має вигляд:

$$PV = \frac{m}{\mu} RT \tag{2}$$

де $V = V_m$,, а $m = V_m = V\rho$.

Із рівняння (2) отримаємо співвідношення, що зв'язує масу і тиск в нашому випадку: $m = k_{сп} P$. Підставивши співвідношення в закон збереження маси (1), отримаємо формулу вимірювання тиску:

$$k_{сп} \frac{dp}{dt} = Q_{вх} - Q_{вих}$$

Мінливе розрідження у робочому полі до і після гвинта генератора враховується в системі рівнянь за допомогою балансу тисків. Запишемо баланс тисків [26] у вигляді системи диференціальних рівнянь для ділянки до і після гвинта генератора:

$$\begin{cases} \dfrac{l_m}{S_m}\dfrac{dQ_{вх}}{dt} = P_{дв} - P_m - P_{от} \\ \dfrac{l}{S}\dfrac{dQ}{dt} = P_{гг} - P_m - P_{отг} \end{cases} \quad (3)$$

Ввівши допущення, що потоки повітря і газу ламінарні, запишемо рівняння гідродинаміки, що встановлюють співвідношення між витратою і втратами тиску на опір:

$$\begin{cases} P_{от} = \xi_{от} Q_{вх} \\ P_{отг} = \xi_{отг} Q_{вих} \end{cases} \quad (4)$$

Перепишемо диференціальні рівняння (3) з урахуванням (4) у вигляді:

$$\begin{cases} \dfrac{l_m}{S_m}\dfrac{dQ_{вх}}{dt} = P_{дв} - P_m - \xi_{от} Q_{вх} \\ \dfrac{l}{S}\dfrac{dQ}{dt} = P_{гг} - P_m - \xi_{отг} Q_{вих} \end{cases}$$

Рівняння дуттьового вентилятора і роботи гвинта генератора в припущенні записуються так, що тиск в них залежить лінійно від швидкості обертання двигуна:

$$\begin{cases} P_{дв} = k_{дв}\omega_{дв} \\ P_{гг} = k_{гт}\omega_{гт} \end{cases}$$

Після перетворень отримані диференціальні рівняння об'єднаємо в систему, що характеризує газоповітряний тракт, як об'єкт регулювання [27]:

$$\begin{cases} Q'_{вх} = -\xi_{от}\dfrac{S_{от}}{l_{от}}Q_{от} + k_{от}\dfrac{S_{от}}{l_{от}}\omega_{от} + \dfrac{S_{от}}{l_{от}}P_m \\ Q'_{вих} = -\xi_{отг}\dfrac{S_{тг}}{l_{тг}}Q_{вих} + k_{тг}\dfrac{S_{тг}}{l_{тг}}\omega_{гт} + \dfrac{S_{тг}}{l_{тг}}P_m \\ P'_m = \dfrac{1}{k_{сп}}Q_{вх} - \dfrac{1}{k_{сп}}Q_{вих} \end{cases} \quad (5)$$

Для моделювання в програмному середовищі SolidWorks Flow Simulation [28] представимо систему рівнянь збереження маси, імпульсу і енергії нестаціонарного просторового течії у декартовій системі координат (x, i = 1, 2, 3), і що обертається з кутовою швидкістю Ω навколо осі, що проходить через її початок:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial\rho}{\partial t} + \dfrac{\partial}{\partial x_k}(\rho u_k) = 0 \\ \dfrac{\partial(pu_i)}{\partial t} + \dfrac{\partial}{\partial x_k}(\rho u_i u_k - \tau_{ik}) + \dfrac{\partial}{\partial x_i} = S_i \\ \dfrac{\partial(pE)}{\partial t} + \dfrac{\partial}{x_k}((pE - P)u_k + q_k) - \tau_{ik}u_i = S_k u_k + Q_H \end{cases} \quad (6)$$

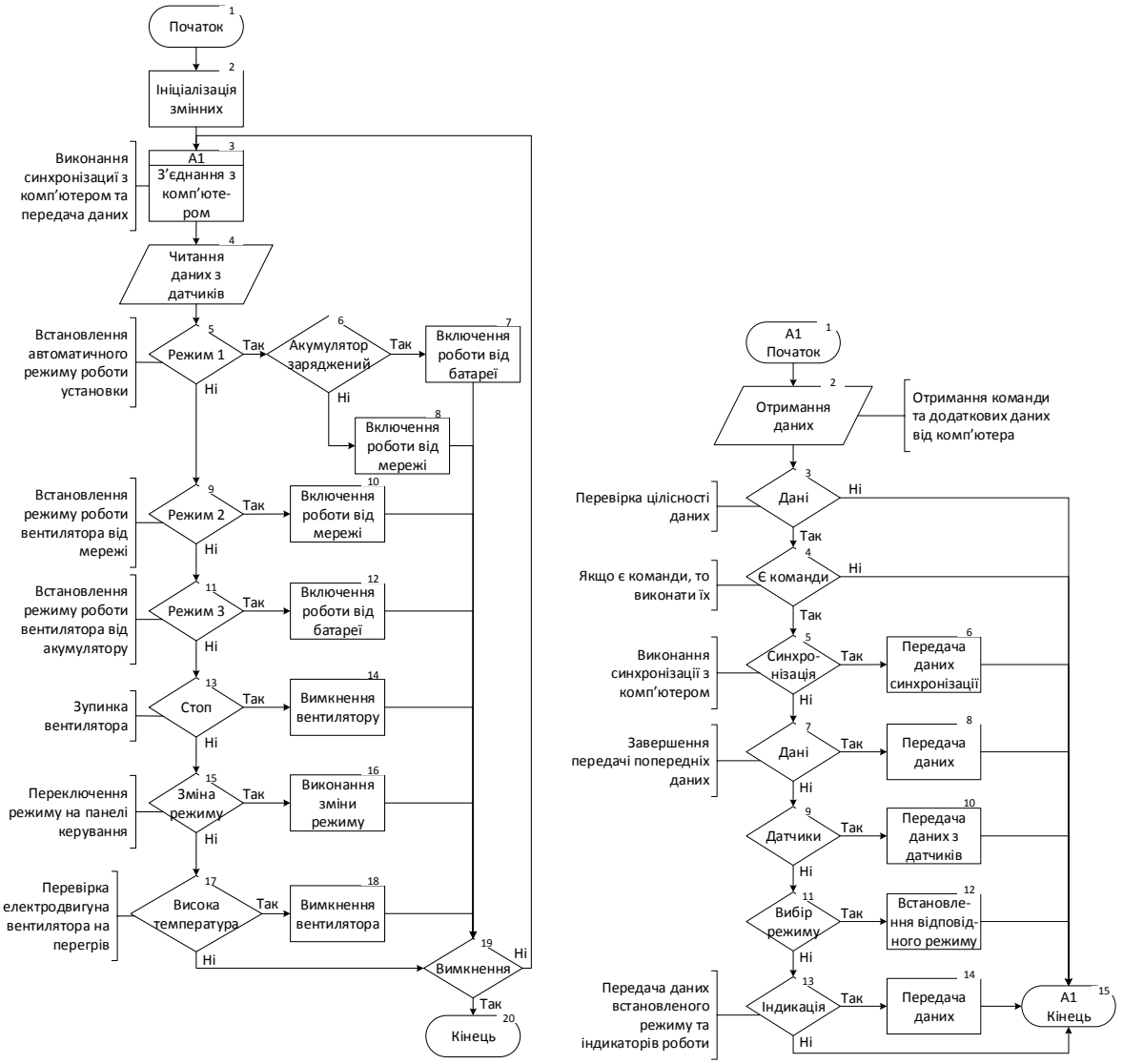
У результаті виконаних досліджень переміщення газоповітряних потоків у технологічному тракті виробничої установки промислового підприємства у програмному середовищі SolidWorks Flow Simulation з використанням рівнянь (5, 6) уточнені основні технічні вимоги, що пред'являються до управління ГПЕУ і на їх основі розроблений оптимальний алгоритм управління, який впроваджений в схему управління ГПЕУ з спеціалізованим мікроконтролером, який забезпечує зв'язок зі SCADA системою, програмне забезпечення якої встановлено на комп'ютері. Алгоритм роботи програми мікроконтролера наведено на рис. 2. Вона складається з основної частини (рис. 2а) та програми для взаємодії з SCADA системою, що знаходиться на ЕОМ (рис. 2б). Таке розділення виконано з ціллю поділити основні функції програми.

Алгоритми роботи мікроконтролера працюють наступним чином. На початку роботи мікроконтролера у блоці 2 (рис. 2а) виконується ініціалізація усіх змінних, що у подальшому будуть використовуватись, а також встановлюються початкові умови роботи системи, а саме установка не повинна працювати без надання відповідної команди. Ініціалізація виконується лише один раз при ввімкнені установки у мережу. При з'єднанні системи з ЕОМ та включені SCADA системи, виконується синхронізація з ЕОМ і передаються дані за допомогою блоку 3 підпрограми А1 (рис. 2, б).

У мікроконтролері, після завершення роботи підпрограми А1, відбувається зчитування даних із датчиків та запис їх у відповідні змінні (блок 4). Дані отримуються від датчиків температури, напруги, струму, обертів електродвигуна вентилятора, напруги і обертів генератора, напруги на акумуляторі.

При встановлені будь-якого режиму виконуються особливі дії. Існує три режими роботи ГПЕУ: «Автоматичний» (режим 1) блоки 5-8, «Від мережі» (режим 2) блоки 9-10, «Від акумуляторної батареї» (режим 3) блоки 11-12. Якщо встановлено режим «Автоматичний» (блок 5), то ГПЕУ повинна сама переключати режими роботи від мережі або від акумулятора в залежності від показників заряду акумулятора. Якщо акумулятор досягнув значення заряду, виконується ввімкнення роботи від нього, якщо досягнуто значення розряду – ввімкнення роботи від мережі. При встановлені режиму «Від мережі» (блок 9), то ГПЕУ працюватиме від електричної мережі і постійно заряджатиме акумулятор від генератора, незалежно від заряду акумулятора. Зарядка акумулятору буде зупинена при повному її заряді. У режимі роботи «Від акумуляторної батареї» (блок 11) ГПЕУ працюватиме тільки від акумулятору доки не буде розряджена до заданого для нього рівня напруги. На панелі керування та фронтальній панелі SCADA системи є кнопка вимкнення роботи ГПЕУ без відключення електричної мережі. У цьому режимі електродвигун вентилятора відключається та не встановлюється будь-який режим. У такому стані ГПЕУ знаходиться як при першому підключені до централізованої живлячої мережі. Далі не допускається натискання будь-якої кнопки на пульті

управління. Якщо була натиснута кнопка, то виконується запис натиснутої кнопки для подальшого виконання дій. На панелі керування встановлені кнопки збільшення та зменшення швидкості обертання ротора двигуна, встановлення режиму роботи установки («Автоматичний», «Від мережі», «Від акумуляторної батареї») та відключення установки. Також, перевіряється чи не були натиснуті декілька кнопок одночасно, які суперечать одна одній. Неможливо одночасно натискати збільшення та зменшення швидкості обертання ротора вентилятора, або відразу декілька кнопок для встановлення режиму.



а б

Рисунок 2. Алгоритми роботи мікроконтролера (а) і підпрограми для з'єднання мікроконтролера з SCADA системою (б)

У разі виконання подібних дій, програма буде ігнорувати зміну швидкості вентилятора або встановлення режиму. У блоці 17 виконується перевірка на температурний режим електродвигуна вентилятора. При високій заданій температурі вентилятор вимикається, але не відбувається зміна режиму роботи. При охолоджені двигуна до певної температури установка продовжує працювати у раніше встановлених параметрах. При вимкнені централізованої живлячої мережі зупиняється робота ГПЕУ. Підпрограма A1 (рис. 2б) запускається при підключені установки через COM-порт USB 2.0 до ЕОМ та включеній SCADA системи. Взаємодія з ГПЕУ виконується шляхом надсилання команд від ЕОМ та відповіді на них мікроконтролером ГПЕУ. При підключені мікроконтролер зчитує інформацію, яку надсилає ЕОМ. Вона складається з команди та додаткових даних для її виконання. Далі виконується перевірка цілісності даних, що надійшли від ЕОМ для уникнення втрати інформації, передачі неправильної інформації. Якщо дані пошкоджені подальше виконання будь-яких дій з інформацією та зміна параметрів ГПЕУ не відбувається.

У SCADA системі є декілька віртуальних підприладів, що відповідають різним командам. Для кожної команди створена окрема функція. При першому підключені мікроконтролера до ЕОМ відбувається

синхронізація роботи, тобто встановлення режиму роботи та налаштування ГПЕУ на роботу від SCADA системи. Якщо мікроконтролер отримує дані від ЕОМ, може їх розпізнати та відповідати на запити, встановлюється передача даних. За цей процес відповідає блок 5 «Синхронізація» (рис. 2б). Так як процес роботи мікроконтролера побудований на постійному виконанні дій, а передання даних потребує часу, то попередня передача даних може не встигати завершуватись до того, як підпрограма А1 знову буде виконуватись. З ціллю створення перевірки на завершення передачі попередніх даних і лише потім виконуються наступні команди (блок 7, рис. 2б).

Далі виконуються команди пов'язані з основною роботою ГПЕУ, а саме передача даних інформації з датчиків (блоки 8-14, рис. 2б), встановлення відповідного режиму установки, передача даних щодо поточного встановленого режиму. При виконанні команди для передачі даних із датчиків виконується відправлення значень, що були отримані у блоку 4 рис. 2а. У ці дані входить інформація про швидкість обертання, напругу, струм та температуру на електродвигуні вентилятора, швидкість обертання та напругу генератора і напругу на акумуляторній батареї. Разом із виконанням команди на встановлення режиму (блок 5, рис. 2 а) надходить значення режиму, що потрібно встановити в ГПЕУ, а також задати швидкість обертання лопотів вентилятора. Ці дані використовуються при виконанні основної програми для зміни поточних параметрів роботи установки.

При виконанні команди на запит ЕОМ відправляються дані щодо встановленого режиму на мікроконтролері та швидкості лопотів вентилятора. Дана команда потрібна для підтвердження виконання установкою певного режиму чи швидкості лопотів вентилятора у SCADA системі. По завершені виконання підпрограми А1 відбувається повернення до основного алгоритму, у якому будуть виконуватись зміни режиму роботи вентилятора, швидкості вентилятора, тощо.

Використовуючи диференціальні рівняння (6) та систему рівнянь Нав'є – Стокса для дослідження газоповітряних мас, розроблена математична модель, яка дозволила виконати дослідження у програмному середовищі SolidWorks Flow Simulation. Результати досліджень лягли в основу формування технічних вимог на розробку нових алгоритмів, що наведені на рис. 2 і програмного забезпечення для мікропроцесорної системи управління лабораторної ГПЕУ. Для визначення достовірності розробленої математичної моделі та алгоритмів роботи ГПЕУ з мікроконтролером, принципових технічних рішень, програмного забезпечення та отримання порівняних результатів, із перевіркою на адекватність, розроблені інформаційне та програмне забезпечення і схема автоматизації та виготовлена лабораторна ГПЕУ, що з'єднується за допомогою мікроконтролера з ЕОМ, яка оснащена SCADA системою (рис.3).

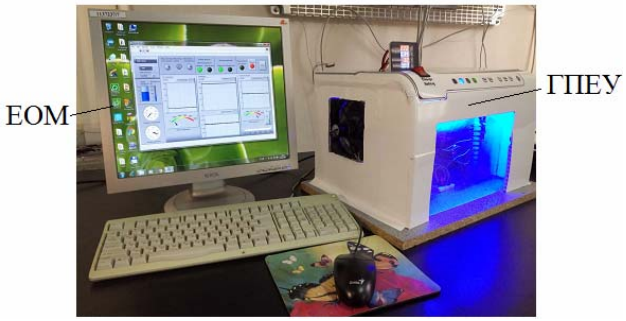


Рисунок 3. Загальний вигляд лабораторної установки ГПЕУ

Експериментально перевірена робота автоматизованого пристрою керування ГПЕУ електроспоживанням технологічної установки, що отримано на віртуальній моделі в середовищі LabVIEW, з метою виявлення закономірностей електроспоживання та підтвердження технічних показників ГПЕУ. Запропонований спосіб вироблення електричної енергії ГПЕУ з мікропроцесорною системою управління, як показали розрахунки, підтверджені експериментальними дослідженнями. Так, кількість витраченої електроенергії технологічною установкою при швидкості повітряного потоку на виході трубопроводу від 5,4 до 3,6 м/с зменшується до 20%. Це можливо за рахунок споживання нею виробленої електричної енергії ГПЕУ, шляхом використання кінетичної енергії потоку маси газів/повітря, відпрацьованих, вивільнених або видуваємих технологічною установкою. Інші параметри знятті методом фізичного моделювання на лабораторній установці такі, як: значення напруг, струму, швидкості повітряного потоку та швидкості обертання вентилятора, представлені у табл. 1.

Впроваджені алгоритми роботи в мікропроцесорну систему лабораторної ГПЕУ повністю задовольнили технічні вимоги, які пред'являються до керування таким об'єктом. SCADA система розроблена у програмному середовищі LabView, дозволяє отримувати дані про стан роботи ГПЕУ та керувати системою у реальному часі. Як показали експериментальні дослідження, швидкість повітряного потоку на виході трубопроводу при 4300 об/хв по різному змінюється у робочому полі гвинта генератора відповідно середини і краю діаметру трубопроводу розміром 110 мм.

Зміна швидкості повітряного потоку у робочому полі гвинта генератора в різних частинах трубопроводу, наведено на рис. 4.

Результати досліджень, отриманих на математичній моделі, використані для перевірки на адекватність з результатами знятими методом фізичного моделювання за допомогою програмного додатку LabView та анемометру, пристрою для вимірювання швидкості повітряного потоку. Значення швидкості повітряного потоку на виході трубопроводу, які були змодельовані через програмний додаток SolidWorks

Таблиця 1. Знятті параметри методом фізичного моделювання, яке проведено на лабораторній установці.

Тип установки	Напруга двигуна, В	Швидкість обертання, Об/хв	Напруга генератора, В	Струм двигуна, А	Витрати електричної енергії, Вт*час	Швидкість повітряного потоку на виході труби, м/с	Швидкість повітряного потоку після генератору, м/с
Без ГПЕУ	23,45	4300	4,55	0,406	9,5	5,4	4,5
З ГПЕУ	23,5	4300	4,35	0,32	7,6	5,4	4,4
Без ГПЕУ	22,08	3507	4,41	0,39	8,69	4,6	3,7
З ГПЕУ	22,1	3500	4,39	9,31	6,95	4,7	3,8
Без ГПЕУ	20,46	3001	2,12	0,37	7,7	3,6	2,7
З ГПЕУ	20,45	3008	2,1	0,3	6,16	3,5	2,6
Без ГПЕУ	18,6	2512	0	0,35	6,45	3	2,1
З ГПЕУ	18,5	2511	0	0,34	6,4	2,98	2,0

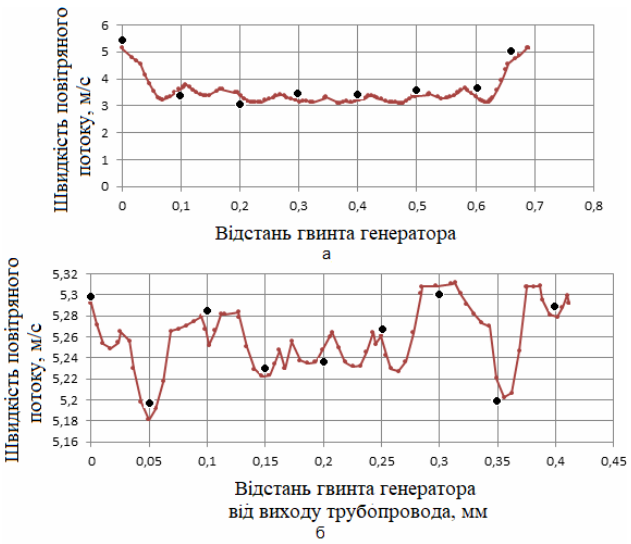


Рисунок 4. Зміна швидкості повітряного потоку у робочому полі гвинта генератора: середин (а) і край (б) діаметру трубопроводу (суцільна лінія – розрахунок, крапки - експеримент).

порівняно із знятими експериментальними даними, отримані на лабораторній установці.

Фронтальна панель SCADA системи представлена на рис. 5.

Окрім того, порівняно швидкості повітряного потоку на виході трубопроводу до і після гвинта генератора, результати порівняння приведені відповідно на рис.6а і рис.6б. Функція зміни швидкості обертання лопотів вентилятора від відстані розташування гвинта генератора на виході трубопроводу, представлені на рис. 6в. Ефективність досліджень у програмному середовищі SolidWorks Flow Simulation візуалізації процесу розподілу газоповітряних потоків при нагнітанні гвинтом вентилятора у трубопровід підтвердили експериментальні дослідження на лабораторній установці.

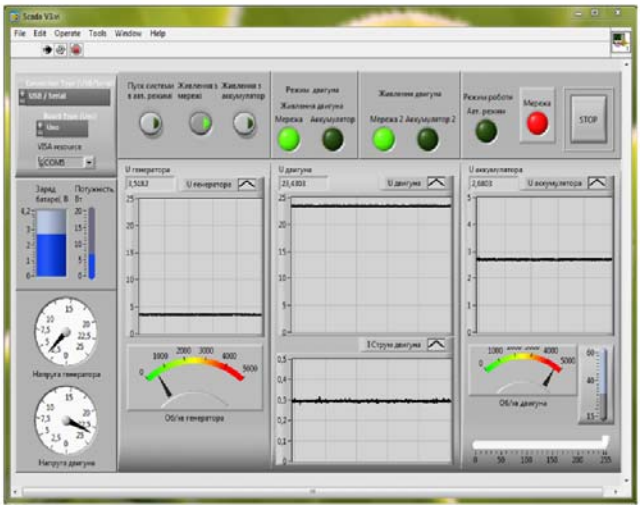


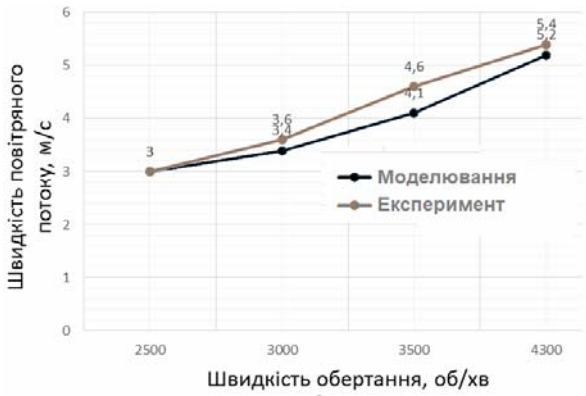
Рисунок 5. Фронтальна панель SCADA системи лабораторної установки

V. ВИСНОВКИ

У роботі обґрунтовано питання ефективного використання кінетичної енергії відпрацьованих технологічною установкою газоповітряних потоків для вироблення електричної енергії, Виконано дослідження працездатності ГПЕУ з розробкою мікропроцесорної системи управління, що використовує новий алгоритм управління і програмне забезпечення до управління газоповітряною енергетичною установкою. Для перевірки на адекватність розроблених алгоритмів управління і програмного забезпечення розроблена лабораторна газоповітряна енергетична установка.

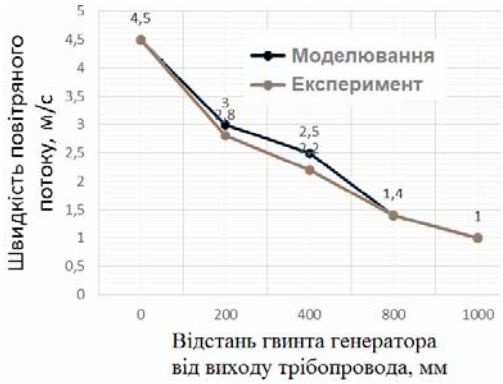
Отримані результати є продовженням раніше проведених досліджень, які відносяться до дослі-

дження процесу вироблення альтернативної електричної енергії в промислових умовах, і направлені на покращення якості вироблення електричної енергії за рахунок розробки новітніх способів і пристроїв для їх реалізації. Це значно покращує енергоефективність ГПЕУ, при використані сучасної елементної бази для реалізації таких пристроїв.



а)

б)



в)

Рисунок 6. Графіки зміни швидкості повітряного потоку на виході трубопроводу до (а) і після гвинта, кінематично пов'язаного з ротором генераторам (б), у функції зміни швидкості обертання лопотів вентилятора і від відстані гвинта генератора на виході трубопроводу (в)

Результати досліджень будуть корисними в алгоритмах системи автоматичного керування ГПЕУ при модернізації або розробці нових систем управління. У підсумку виконаних досліджень, зроблені наступні висновки:

1. На основі розробленої математичної моделі та отриманих результатів дослідження газоповітряних технологічних установок промислового підприємства у програмному середовищі SolidWorks Flow Simulation розроблений алгоритм управління ГПЕУ, який забезпечує виконання технічних вимог, що пред'являються до управління ГПЕУ. Використання розподілу газоповітряних потоків будь-якої складності, отриманих на основі дослідження повністю інтегрованого програмного продукту SolidWorks, одержало подальший розвиток в алгоритмах роботи мікропроцесорної системи управління ГПЕУ для промислового використання.

2. Розроблені алгоритми дозволили використати сучасне програмне забезпечення для мікропроцесорної системи управління ГПЕУ. Програмне забезпечення складається з простих і дешевих технічних засобів управління ГПЕУ і дозволило використати найбільш простий мікроконтролер Arduino Uno.

3. Удосконалена структурна схема управління ГПЕУ, роботою якої управляє мікроконтролер за сигналами з датчиків: обертів, струму, напруги, температури електродвигуна вентилятору, обертів і напруги генератора та датчика заряду акумулятора. Це забезпечується раціональним використанням газоповітряних потоків технологічних установок і впливає на отримання максимальної електричної енергії.

4. Уперше на основі виконаних досліджень технологічних процесів на віртуальної моделі в середовищі LabVIEW розроблено програмне забезпечення для зв'язку ГПЕУ зі SCADA системою, яка встановлена на ЕОМ. Через інтерфейс USB-2 ГПЕУ з'єднується з ЕОМ. Це дає можливість дистанційно управляти роботою ГПЕУ і контролювати основні режими її роботи.

Удосконалена мікропроцесорна система управління з розробленими алгоритмами і програмним забезпеченням для роботи газоповітряної енергетичної установки, що використовує кінетичну енергію відпрацьованих технологічною установкою газоповітряних потоків для вироблення електричної енергії, може бути використана в промислових умовах. Впровадження газоповітряних енергетичних установок із мікропроцесорною системою і SCADA системою дозволить підвищити енергоефективність роботи технологічних установок.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

[1]. World Wind Energy Association, "2014 half-year report." [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.wwindea.org/webimages/WWEA_half_year_report_2014.pdf. – Назва з екрану. – Дата перегляду: 27.01.17.

[2]. Rodrigo, T.P., Sílvio, F.R., Edwin, W., Ricardo, S., Pavol, B., Jan, P. (2013). Operation and Power Flow Control of Multi-Terminal DC Networks for Grid In-

tegration of Offshore Wind Farms Using Genetic Algorithms. Energies, 6, 1–26. doi:10.3390/en6010001.

[3]. Alexander, K., Bruno, U.S., Lueder, V.B. (2016). Curtailment in a Highly Renewable Power System and Its Effect on Capacity Factors. Energies, 9, 510. doi: 10.3390/en9070510.

[4]. Design and operation of power systems with large amounts of wind_power [Електронний ресурс]. – Режим доступу: www.vtt.fi/inf/pdf/technology /2016/T268.pdf. – Назва з екрану. – Дата перегляду: 27.01.17.

[5]. Енергетична стратегія України на період до 2030 року [Електронний ресурс]. – Режим доступу: zakon1.rada.gov.ua/signal/kr06145a.doc. – Назва з екрану. – Дата перегляду: 27.12.17.

[6]. Инженерный анализ в среде SolidWorks Simulation [Електронний ресурс]. – Режим доступу: sapr.ru/article/19880. – Назва з екрану. – Дата перегляду: 27.01.17.

[7]. Івашко О. Як підкорили вітер сучасні Дон Кіхоти : в Миколаїв. обл. запрацювала перша промислова вітроелектростанція // Уряд. кур'єр, 2012. – № 2.– С.8.

[8]. PSS E Wind and Solar Models [Електронний ресурс]// UWIG/EnerNex/DOE Workshop. – Електрон. дані. – NY, 2011. – Режим доступу: http://www.nyiso.com/public/webdocs/markets_operations/services/planning/Documents_and_Resources/Conferences_and_Workshops/DOE_Wind_Turbine_Plant_Mdlg_wkshop/PSSE_Wind_Solar_Models_Kazachkov.pdf. – Назва з екрану. – Дата перегляду: 07.12.17

[9]. Мацкевич П. Використання енергії вітру // ЕКОінформ. –2011. – № 5. – С. 36-38.

[10]. Кузьо І. В. Обгрунтування розвитку вітроененергетичних установок малої та надмалої потужності / І. В. Кузьо, В. М. Корендій // Вісн. Нац. ун-ту "Львів. політехніка". Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль в машинобудуванні та приладобудуванні. – Львів, 2010. – № 679. – С. 61-67.

[11]. Петренко Н. Ветрогенераторы малой мощности // Радиоаматор. – 2013. – № 7. – С. 40-43.

[12]. Соколовский Ю. Б. Повышение эффективности ветровых энергетических установок / Ю. Б. Соколовский, А. Ю. Соколовский, Л. Г. Лимонов // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2014. – № 9. – С. 28-37.

[13]. The wind energy fact sheet - Office of Environment and Heritage [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.environment.nsw.gov.au/resources/households/WindEnergyfactsheet.pdf. – Назва з екрану. – Дата перегляду: 27.01.17.

[14]. Алексієвський Д. Г. Визначення робочої області ІППН у складі електромеханічної системи ВЕУ зі змінною швидкістюобертання [Текст] / Д. Г. Алексієвський, П. Д. Андрієнко, К. О. Туришев, О.О. Панкова // Електротехніка та електроенергетика. – 2017 – №1 – С. 79 – 85. DOI: 10.15588/1607-6761-2017-1-10

[15]. Немудрий І. Ю. Підвищення ефективності перетворення електроенергії в вітроелектричних установках з аеродинамічною мультиплікацією [Текст] / І. Ю. Немудрий // Електротехніка та електроенергетика. – 2014 – №1 – С. 79 – 86. DOI: 10.15588/1607-6761-2014-1-13

[16]. Шихайлов М. О. Особенности конструкций и использование ветроэнергетических установок малой мощности / М. О. Шихайлов, Ю. П. Фаворский // Электрик. – 2006. – № 1-2. – С. 29-31.

[17]. Makarchuk O. The electromagnetic transformer of mechanical energy into heat for wind turbine / O. Makarchuk, A. Rusek, I. Shchur, V. Shchur // Przegląd Elektrotechniczny (ElectricalReview). – 2015. – R. 91, nr 1. – P. 179-182.

[18]. Wind turbine control [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www3.nd.edu/~tcorke/w.WindTurbineCourse/WindTurbineControl_Presentation.pdf. – Назва з екрану. – Дата перегляду: 27.01.17.

[19]. Скрипник О.І. Математична модель вітрогенератора типу DFIG для аналізу стійкості електричних систем / О. І. Скрипник, В.С. Коновал // Наукові праці ДонНТУ. Серія: «Електротехніка і енергетика» №2 (15)' - 2013. – С. 234-239.

[20]. M. Savaghebi, et al. (2012). Secondary Control Scheme for Voltage Unbalance Compensation in an Islanded Droop-Controlled Microgrid, Smart Grid, IEEE Transactions on, vol. 3, pp. 797-807.

[21]. T. L. Vandoorn, et al. (2012). Analogy Between Conventional Grid Control and Islanded Microgrid Control Based on a Global DC-Link Voltage Droop, Ieee Transactions on Power Delivery, vol. 27, pp. 1405-1414.

[22]. Пат. № 62126 Україна, МПК (2011.01) H02J 13/00. Пристрій для автоматичного керування електроспоживанням / П. Г. Плєшков, І. В. Савеленко, О. І. Сіріков; заявн. Кіровоградський національний технічний університет. - №201101588; заявл. 11.02.2011; опубл. 10.08.2011; Бюл. № 15. – 2 с.

[23]. Пат. № 109070 Україна, МПК (2016.01) H02J 13/00. Пристрій для автоматичного керування електроспоживанням / В. Й. Лобов, Є. Л. Єфіменко, М. П. Тиханський, М. С. Чернюк; заявн. ДВНЗ «Криворізький національний університет». - №201600998; заявл. 08.02.2016; опубл. 26.09.2016; Бюл. № 18. – 7 с.

[24]. Пат. № 105303 Україна, МПК (2016.01) F03D 1/04, F03D 9/25. Спосіб отримання електроенергії / Лобов В.Й., Лобова К.В.; заявн. ДВНЗ «Криворізький національний університет». - № 201509470; заявл. 01.10.2015; опубл. 10.03.2016, Бюл. № 5. – 6 с.

[25]. Пат. № 119021 Україна. МПК (2006) F03B 13/00/ Пристрій для автоматичного керування електроспоживанням технологічної установки / Лобов В.Й., Лобова К.В. Даць А.В.; заявн. ДВНЗ «Криворізький національний університет». - № u201701906; заявл. 27.02.2017; опубл. 11. 09. 2017, Бюл. №17. – 7 с.

[26]. Бойко Е.А. Аэродинамический расчет котельных установок / Е.А. Бойко, И.С. Деринг, Т.И. Охорзина. – Красноярск: КГТУ, 2006. – 71 с.

[27]. Ложечников В.Ф. Структура многомерной математической модели динамики барабанного котла средней мощности / В.Ф. Ложечников, А.А. Стопакевич // Оптимизация управления, информационные системы и компьютерные технологии / Труды Украинской академии экономической кибернетики (Южный научный центр). – Киев–Одесса: ИСЦ. - 1999. – № 1. – Ч.2. – С. 167–176.

[28]. Алямовский А.А. SolidWorks 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике/ А.А. Алямовский, А.А. Собачкин, Е.В. Одинцов, А.И. Харитонович, Н.Б. Пономарев. – СПб.: БХВ-Петербург, 2008. - 1040с.

Стаття надійшла до редакції 6.12.2017

УПРАВЛЕНИЕ ГАЗОВОЗДУШНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКОЙ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

ЛОБОВ В.И. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры автоматизации, компьютерных наук и технологий, Криворожский национальный университет, Кривой Рог, Украина, *e-mail: lobovvjcheslav@gmail.com*;

ЛОБОВА К.В. студентка кафедры автоматизации, компьютерных наук и технологий, Криворожский национальный университет, Кривой Рог, Украина, *e-mail: karinalobova409@gmail.com*;

ДАЦЬ А.В. студент кафедры автоматизации, компьютерных наук и технологий, Криворожский национальный университет, Кривой Рог, Украина, *e-mail: dats1996@yandex.ru*;

Цель работы. *Обосновать вопрос эффективного использования кинетической энергии отработанных технологической установкой газовоздушных потоков для выработки электрической энергии, что позволит разработать новый алгоритм управления и создать новое программное обеспечение для управления газовоздушной энергетической установкой. Для проверки на адекватность разработанных алгоритмов управления и программного обеспечения разработать лабораторную газовоздушную энергетическую установку.*

Методи исследования. *Для исследования распределения газовоздушных масс в технологических установках промышленного предприятия использован метод имитационного моделирования, выполненный в программной среде SolidWorks Flow Simulation. Метод имитационного моделирования позволил разработать новый алгоритм управления и создать новое программное обеспечение с учетом основных технических требований, предъявляемых к управлению газовоздушной энергетической установкой. Для проверки работоспособности разработанных алгоритмов и программного обеспечения управления газовоздушной энергетической установкой использован метод физического моделирования, проведенного на разработанной лабораторной установке, соединенной через интерфейс USB с ЭВМ, имеет виртуальную модель SCADA системы, представленную в среде LabVIEW.*

Полученные результаты. *На основе моделирования газовоздушных потоков на разработанной математической модели оптимально выбранные соотношения размеров трубопровода, рационально определены расходы газовоздушной смеси, необходимой для наиболее эффективной работы газовоздушной энергетической установки, то есть в рабочей зоне газовоздушного тракта винт генератора контактирует с наиболее значительными потоками, обеспечивая максимальный эффект вращения. Полученные результаты исследования газовоздушных потоков технологических установок промышленного предприятия в программной среде SolidWorks Flow Simulation и на их основе разработаны основные технические требования, предъявляемые к управлению газовоздушной энергетической установкой. Разработан оптимальный алгоритм управления, который позволил внедрить его в схему управления газовоздушной энергетической установки с микропроцессором или специализированным микроконтроллером.*

Научная новизна. *Найдены новые возможности дальнейшего усовершенствования известных базовых математических моделей кинетики газовоздушных потоков и предложены варианты адаптации в области газодинамики для оценки расходов газовоздушных потоков при работе вентиляторной установки на трубопровод. Разработана структурная схема и алгоритмы управления газовоздушной энергетической установкой, в которую входят вентилятор, генератор, трубопровод и блок управления, выполненный на основе использования микроконтроллера Arduino Uno. Разработан также алгоритм подпрограммы для соединения газовоздушной энергетической установки со SCADA системой.*

Практическая ценность. *Предложенный способ выработки электрической энергии газовоздушной энергетической установкой с микропроцессорной системой управления, как показали расчеты, подтвержденные экспериментальными исследованиями на лабораторной установке, позволяет уменьшить до 20% количества*

затраченной электроэнергии технологической установкой и может быть использован в промышленных условиях. Внедрение газовоздушных энергетических установок с микропроцессорной системой и SCADA системой позволит повысить энергоэффективность работы технологических установок.

Ключевые слова: *технологическая установка; газовоздушные потоки; электрическая энергия; управление; микроконтроллер; алгоритмы.*

MANAGEMENT OF GAS-AIR ENERGY INSTALLATION OF INDUSTRIAL ENTERPRISE

LOBOV V.Y. associate professor, associate professor of the department of automation, computer science and technology, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine, *e-mail: lobov-vjcheslav@gmail.com*;

LOBOVA K.V. student of the department of automation, computer science and technology, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine, *e-mail: karinalobova409@gmail.com*;

DATS A.V. student of the department of automation, computer science and technology, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine, *e-mail: dats1996@yandex.ru*;

Purpose. *The goal of the work is to substantiate the issue of effective use of kinetic energy of gas-air flows used by the technological installation for generating electric power, which will allow developing a new control algorithm and creating new software for controlling the gas-air power plant. To test the adequacy of the developed control algorithms and software, to develop a laboratory gas-air power plant.*

Methodology. *To investigate the distribution of air-gas mass in process plants used industrial plant simulation method performed in software SolidWorks Flow Simulation. The method of simulation allowed to develop a new control algorithm and create new software taking into account the basic technical requirements for the management of the gas-air power plant. To test the efficiency of the developed algorithms and control software for the gas-air power plant, a physical modeling method was used on a developed laboratory installation connected via a USB interface with a computer and has a virtual model of the SCADA system presented in the LabVIEW environment.*

Findings. *Based on the modeling of gas-air flows on the developed mathematical model, the optimal ratios of pipeline sizes are rationally determined, the gas-air mixture costs necessary for the most efficient operation of the gas-air power plant, that is, in the working zone of the gas-air path, the generator screw contacts the most significant flows, providing the maximum effect rotation. The obtained results of research of gas-air flows of technological installations of an industrial enterprise in the software environment of SolidWorks Flow Simulation and on their basis the basic technical requirements for the management of a gas-air power plant are developed. An optimal control algorithm has been developed that enabled it to be introduced into the control scheme of a gas-air power plant with a microprocessor or a specialized microcontroller.*

Originality. *New possibilities for further improvement of the known basic mathematical models of the kinetics of gas-air flows have been found and variants of adaptation in the field of gas dynamics have been proposed for estimating the expenditure of gas-air flows during the operation of a fan installation on a pipeline. The structural scheme and algorithms for controlling the gas-air power plant are developed, which includes a fan, a generator, a pipeline and a control unit based on the use of the Arduino Uno microcontroller. The algorithm of the subroutine for connecting the gas-air power plant with the SCADA system.*

Practical value. *The proposed method of generating electric power by a gas-air power plant with a microprocessor control system, as shown by calculations confirmed by experimental studies on a laboratory installation, allows to reduce up to 20% of the amount of spent electricity by a process unit and can be used in industrial conditions. The introduction of gas-air power plants with a microprocessor system and a SCADA system will improve the energy efficiency of process plants.*

Keywords: *technological installation; gas-air streams; electric energy; control; microcontroller; algorithms.*

REFERENCES

[1]. World Wind Energy Association, "2014 half-year report." [Elektronnyy resurs]. – Rezhym dostupu: http://www.wwindea.org/webimages/WWEA_half_year_report_2014.pdf. – Nazva z ekranu. – Data perehlyadu: 27.01.17.

[2]. Rodrigo, T.P., Sílvio, F.R., Edwin, W., Ricardo, S., Pavol, B., Jan, P. (2013). Operation and Power Flow Control of Multi-Terminal DC Networks for Grid Integration of Offshore Wind Farms Using Genetic Algorithms. Energies, 6, 1–26. doi:10.3390/en6010001.

[3]. Alexander, K., Bruno, U.S., Lueder, V.B. (2016). Curtailment in a Highly Renewable Power System and Its Effect on Capacity Factors. Energies, 9, 510. doi: 10.3390/en9070510.

[4]. Design and operation of power systems with large amounts of wind power [Elektronnyy resurs]. – Rezhym dostupu: www.vtt.fi/inf/pdf/technology/2016/T268. pdf. – Nazva z ekranu. – Data perehlyadu: 27.01.17.

[5]. Enerhetychna stratehiya Ukrayiny na period do 2030 roku [Elektronnyy resurs]. – Rezhym dostupu:

zakon1.rada.gov.ua/signal/kr06145a.doc. – Nazva z ekranu. – Data perehlyadu: 27.12.17.

[6]. Inzhenernyy analiz v srede SolidWorks Simulation [Elektronnyy resurs]. – Rezhym dostupu: sapr.ru/article/19880. – Nazva z ekranu. – Data perehlyadu: 27.01.17.

[7]. Ivashko, O. (2012). Yak pidkoryly viter suchasni Don Kikhoty : v Mykolayiv. obl. zapratsyuvala persha promyslova vitroelektrostantsiya, Uryad. kur'yer, 2, 8.

[8]. PSS E Wind and Solar Models [Elektronnyy resurs]// UWIG/EnerNex/DOE Workshop. – Elektron. dani. – NY, 2011. – Rezhym dostupu: http://www.nyiso.com/public/webdocs/markets_operations/services/planning/Documents_and_Resources/Cofeences_and_Workshops/DOE_Wind_Turbine_Plant_Mdlg_wkshop/PSSE_Wind_Solar_Models_Kazachkov.pdf. – Nazva z ekranu. – Data perehlyadu: 07.12.17.

[9]. Matskevych, P. (2011). Vykorystannya enerhiyi vitru. EKOinform. 5, 36-38.

[10]. Kuzo, I. V., Korendiy V. M. (2010). Obhruntuvannya rozvytku vitroenenerhetychnykh ustanovok maloyi ta nadmaloyi potuzhnosti, Visn. Nats. un-tu "Lviv. politekhnika". Optymizatsiya vyrobnychykh protsesiv i tekhnichnyy kontrol v mashynobuduvanni ta pryladobuduvanni, Lviv, 679, 61-67.

[11]. Petrenko, N. (2013). Vetroheneratory maloy moshchnosty. Radyoamator, 7, 40-43.

[12]. Sokolovskiy, YU. B., Sokolovskiy, A. YU., Limonov L. G. (2014). Povysheniye effektivnosti vetrovykh energeticheskikh ustanovok. Energosberezheniye. Energetika. Energoaudit, 9, 28-37.

[13]. The wind energy fact sheet - Office of Environment and Heritage [Elektronnyy resurs]. – Rezhym dostupu: http://www.environment.nsw.gov.au/resources/households/WindEnergyfactsheet.pdf. – Nazva z ekranu. – Data perehlyadu: 27.01.17.

[14]. Alekseyevsky P. D., Andrienko K. O., Turyshev K. O., Pankova O. O. Definition of the working area of the IPPN in the electromechanical system of the VEU with variable speed rotation, Electrical Engineering And Power Engineering, 2017, 1, 79–85. DOI: 10.15588/1607-6761-2017-1-10

[15]. Nemudryi I. Yu. Improving the efficiency of converting electricity into wind turbines with aerodynamic animation, Electrical Engineering And Power Engineering, 2014, 1, 79–86. DOI: 10.15588/1607-6761-2014-1-13

[16]. Shikhaylov, M. O., Favorskiy, YU. P. (2006). Osobennosti konstruktsiy i ispol'zovaniye vetroenergeticheskikh ustanovok maloy moshchnosti. Elektrik, 1-2, 29-31.

[17]. Makarchuk, O., Rusek, A., Shchur, I., Shchur, V. (2015). The electromagnetic transformer of mechanical energy into heat for wind turbine. Przegląd Elektrotechniczny, 91, 1, 179-182.

[18]. Wind turbine control [Elektronnyy resurs]. – Rezhym dostupu: https://www3.nd.edu/~tcorke/w.WindTurbineCourse/WindTurbineControl_Presentation.pdf. – Nazva z ekranu. – Data perehlyadu: 27.01.17.

[19]. Skrypnyk, O. I. Konoval, V. S. (2013). Matematychna model vitroheneratora typu DFIG dlya analizu stiykosti elektrychnykh system, Naukovi pratsi DonNTU. Seriya: «Elektrotekhnika i enerhetyka», 2 (15), 234-239.

[20]. Savaghebi, M., et al. (2012). Secondary Control Scheme for Voltage Unbalance Compensation in an Islanded Droop-Controlled Microgrid, Smart Grid, IEEE Transactions on, 3, 797-807.

[21]. Vandoorn, T. L., et al. (2012). Analogy Between Conventional Grid Control and Islanded Microgrid Control Based on a Global DC-Link Voltage Droop, Ieee Transactions on Power Delivery, 27, 1405-1414.

[22]. Pat. № 62126 Ukrayina, MPK (2011.01) H02J 13/00. Prystriy dlya avtomatychnoho keruvannya elektrospozhyvannyam / P. H. Plyeshkov, I. V. Savelenko, O. I. Sirikov; zayavn. Kirovohradskyy natsionalnyy tekhnichnyy universytet. - №201101588; zayavl. 11.02.2011; opubl. 10.08.2011; Byul. № 15. – 2 s.

[23]. Pat. № 109070 Ukrayina, MPK (2016.01) H02J 13/00. Prystriy dlya avtomatychnoho keruvannya elektrospozhyvannyam / V. Y. Lobov, YE. L. Yefimenko, M. P. Tykhanskyy, M. S. Chernyuk; zayavn. DVNZ «Kryvorizkyy natsionalnyy universytet». - №201600998; zayavl. 08.02.2016; opubl. 26.09.2016; Byul. № 18. – 7 s.

[24]. Pat. № 105303 Ukrayina, MPK (2016.01) F03D 1/04, F03D 9/25. Sposib otrymannya elektroenerhiyi / V. Y. Lobov, K. V. Lobova; zayavn. DVNZ «Kryvorizkyy natsionalnyy universytet». - № 201509470; zayavl. 01.10.2015; opubl. 10.03.2016, Byul. № 5. – 6 s.

[25]. Pat. № 119021 Ukrayina, MPK (2006) F03B 13/00/ Prystriy dlya avtomatychnoho keruvanya elektrospozhyvannyam tekhnolohichnoyi ustanovky / Lobov V.Y., Lobova K.V. Dats A.V.; zayavn. DVNZ «Kryvorizkyy natsionalnyy universytet». - № u201701906; zayavl. 27.02.2017; opubl. 11.09.2017, Byul. №17. – 7 s.

[26]. Boyko, E. A., Derynh, I. S., Okhorzyna, T. I. (2006). Aerodinamicheskiy raschet kotel'nykh ustanovok. Krasnoyarsk: KGTU, 71.

[27]. Lozhechnikov, V. F., Stopakevich, A. A. (1999). Struktura mnogomernoy matematicheskoy modeli dinamiki barabannogo kotla sredney moshchnosti. Optimizatsiya upravleniya, informatsionnyye sistemy i komp'yuternyye tekhnologii. Trudy Ukrainskoy akademii ekonomicheskoy kibernetiki (Yuzhnyy nauchnyy tsentr). Kiyev-Odessa: ISTS, 1, 2, 167–176.

[28]. Alyamovskiy, A. A., Sobachkin, A. A., Odintsov, Ye. V., Kharitonovich, A. I., Ponomarev N. B. (2008). SolidWorks 2007/2008. Komp'yuternoye modelirovaniye v inzhenernoy praktike. SPb. BKHV-Peterburg, 1040.