

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ "ЗАПОРІЗЬКА ПОЛІТЕХНІКА"



Науковий журнал

ЕЛЕКТРОТЕХНІКА та ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА

№1'2023

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

Виходить 4 рази на рік

Запоріжжя

2023

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

ЗАКОРДОННІ ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ
КОЛЕГІЇ

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

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

ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ (Україна)

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

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

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

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

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

Комп'ютерна верстка Дяченко О.О. Редактор англійських текстів Войтенко С.В. Журнал підписано до друку 24.04.2023 за рекомендацією вченої ради національного університету "Запорізька політехніка" (протокол №6 від 16.02.2023 р.). Формат 60x84/8. Ум. Др. Арк. 4,88. Тираж 300 прим. Зам. №189.

ZAPORIZHZHIA POLYTECHNIC NATIONAL UNIVERSITY



Scientific journal

ELECTRICAL ENGINEERING & POWER ENGINEERING

№1'2023

Founded by Zaporizhzhia Polytechnic National University in May 1999

4 issues per year

Zaporizhzhia

2023

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

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

FOREIGN MEMBERS OF EDITORIAL BOARD

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

MEMBERS OF EDITORIAL BOARD (Ukraine)

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

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

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

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

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

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

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

Computer layout Dyachenko O.O. Editor of English texts Voitenko S.V. The journal was signed on April 24, 2023 on the recommendation of the academic council of the Zaporizhzhia Polytechnic National University (Protocol No.6 dated February 16, 2023). Sheet size 60x84/8. Cond. Print. Sheets 4,88. Number of copies printed 300. Rep. №189.

ЗМІСТ

I ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

Назарова О.С., Васильєв Б.В., Шокуров Д.Р.

Удосконалення системи діагностики стана холодної прокатки на основі бази даних його електромеханічних процесів.....7

Беззуб М.А., Бялобржеський О.В., Тодоров О.В.

Дослідження розподілу гармонічних компонентів потужності в силовій схемі динамічного відновлювача напруги.....19

Шишкін І.Р., Луцин С.П.

Електрична схема управління електродвигуном на IGBT-транзисторах.....30

II ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА

Олішевський І.Г., Гусєв О.Ю., Олішевський Г. С.

Автоматизована методика розрахунку параметрів для нетрадиційної технології теплофікаційного режиму гідроакумуючої станції.....36

CONTENTS

I ELECTRICAL ENGINEERING

Nazarova O.S., Vasyliiev B.V., Shokurov D.R.

Improvement of the cold rolling mill diagnostic system based on the data base of its electromechanical processes.....7

Bezzubm.A., Bialobrzheskyi O.V., Todorov O.V.

The power harmonic components distribution study in the power circuit of a dynamic voltage restorer.....19

Shishkin I.R., Lushchin S.P.

Controlling electrical circuit of electric motor on IGBT transistors30

II POWER ENGINEERING

Olishevskiy I.H., Gusev O.Yu., Olishevskiy H.S.

Automated methodology of calculating parameters for NON-traditional technology of heating mode of hydro-storage power plant station.....36

УДК 621.31:62-83:004.9

УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ДІАГНОСТИКИ СТАНА ХОЛОДНОЇ ПРОКАТКИ НА ОСНОВІ БАЗИ ДАНИХ ЙОГО ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

- НАЗАРОВА О.С. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електроприводу та автоматизації промислових установок Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: nazarova16@gmail.com;
- ВАСИЛЬЄВ Б.В. магістр кафедри електроприводу та автоматизації промислових установок Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: vasbohndan@gmail.com;
- ШОКУРОВ Д.Р. студент кафедри електроприводу та автоматизації промислових установок Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: danilshokurov03@gmail.com.

Мета роботи. Удосконалити систему діагностики стану холодної прокатки на основі бази даних його електромеханічних процесів, шляхом розробки нечіткої системи прийняття рішення про стан електроприводів прокатного стану, що підвищить ефективність існуючої системи діагностики.

Методи дослідження. Математичне та комп'ютерне моделювання.

Отримані результати. Розроблено нечітку систему прийняття рішень про стан двох взаємопов'язаних електроприводів розмотувального механізму та прокатної кліти для дослідження та попередження передавального стану, пов'язаного з обривом смуги металу, що прокатується. Вказана система прийняття рішень побудована на основі бази даних електромеханічних процесів електроприводів дресировального однокільового стану холодної прокатки цеху холодної прокатки №1 ПАТ «Запоріжсталь». На вході цієї системи задано напруження якорного кола двигуна розмотувального механізму, струм якорного кола двигуна розмотувального механізму, натяг смуги металу, що прокатується, на ділянці між розмотувачем та прокатною кліткою. На виході отримано загальний стан системи, який залежить від значень вхідних даних. Отримання вимірної інформації про параметри діагностування здійснено на основі даних датчиків струму та напруги, які встановлені на промисловому обладнанні. Інформація про значення сили натягу смуги металу, що прокатується можна отримати як шляхом встановлення додаткових вимірних пристроїв, так і непрямою шляхом, використовуючи математичні моделі поточного радіуса рулона та лінійної швидкості смуги металу, що прокатується.

Наукова новизна. Удосконалено систему діагностики стану холодної прокатки шляхом введення до її складу нечіткої системи прийняття рішення на основі бази даних про електромеханічні процеси електроприводів розмотувального механізму і кліти, що дозволить попередити аварійний стан, обумовлений обривом смуги металу, що прокатується.

Практична цінність. Попередження обриву смуги металу, що прокатується на основі удосконаленої системи діагностики стану холодної прокатки, що використовує інформацію бази даних його електромеханічних процесів з метою підвищення ефективності процесу керування якістю продукції. Використовуючи повну упорядковану інформацію та досвід експлуатації стану холодної прокатки можна формувати технічні та технологічні рішення щодо модернізації діючого та розробки нового технологічного обладнання та систем автоматичного керування електроприводами прокатних станів.

Ключові слова: діагностика; база даних; електромеханічні процеси; стан холодної прокатки; нечітка логіка; перехідний процес; моделювання.

I. ВСТУП

Діагностика обладнання складних технологічних установок – запорука їх безпечної та ефективної експлуатації. Метою створення систем діагностики є вчасне запобігання можливих відмов і порушень у роботі систем і устаткування; необхідність мати повну і цілісну картину фактичного технічного стану експлуатованих систем і устаткування; прогнозування з великою точністю залишкового ресурсу працездатності обладнання; мінімізація вартості та підвищення

ефективності робіт із моніторингу технічного стану, технічного обслуговування, ремонту та управління ресурсними характеристиками систем і устаткування; безперервне вдосконалення, базуючись на об'єктивних даних експлуатації, фактичних характеристик безпеки, надійності та експлуатаційної готовності [1].

В даний час застосування мікропроцесорної техніки посприяло «інтелектуалізації» промислового обладнання. Яскравий приклад тому — електричні приводи, що представляють собою системи, здатні до,

самоналаштування і адаптації. Подібні системи набувають все більшого поширення в якості приводної техніки для високопродуктивних ліній.

Автоматизована система діагностики електромеханічних процесів прокатних станів [2] є специфічною системою від якості роботи якої, залежить ефективність технологічних процесів та якість прокатної продукції. Будь-який збій в роботі датчиків чи програмного забезпечення може призвести до аварійного режиму та простою обладнання [3]. Через те потрібно правильно спроектувати систему, якісно підібрати та встановити датчики, правильно виконати налагодження пристроїв моніторингу та діагностики, що є актуальною науковою задачею та має практичний інтерес.

II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

У металургійній промисловості автоматизований електричний привід застосовується в переважній більшості установок і технологічних комплексів. До половини всієї споживаної металургійними підприємствами електроенергії припадає на електроприводну техніку [2]. Зростання потужностей прокатного виробництва останнім часом є пов'язаним з поширенням попиту на високоякісні різновиди прокату (з підвищеними вимогами до товщини листа та стану поверхні, з захисним покриттям, додатковою термічною обробкою). Це призвело до суттєвого підвищення витрат енергії на тону кінцевої продукції. Компенсація об'єктивного зростання таких витрат потребує постійного удосконалення обладнання, технології та автоматизації керування виробництвом [3].

У статті [1] розглянуті методи оперативного контролю технічного стану обладнання товстолистових прокатних станів. Визначено фактори, які впливають на ефективність використовуваних в АСУ алгоритмів діагностування, зокрема, організації збору та обробки статистичних даних по можливостях виникнення несправностей і за витратами на їх пошук і усунення. Виконано формалізацію методів побудови і опису математичних моделей об'єкта діагнозу. В роботі [2] наведено метод оцінки стану електричних приводів, заснований на побудові нейронної мережі. Розроблений метод діагностування дозволяє взяти на себе функцію контролю за динамікою швидкості і оперативно попереджати відхилення в роботі електроприводу прокатного стану кліті.

Вібродіагностичним методом проведено неруйнівний контроль стану підшипникових опор головного приводу горизонтальних валків стану 1150 ПАТ «Запоріжсталь». Проаналізовано причини виходу з ладу підшипникових вузлів з подальшою видачею рекомендацій щодо розробки методик діагностування приводів горизонтальних валків та визначення оптимального технічного рішення для їх реалізації [3].

Одним з найбільш важливих сучасних напрямів розвитку інформаційних технологій є застосування

нечіткої логіки при розробці систем автоматизованої обробки інформації та управління. Перевагами використання нечіткої логіки є спрощення моделювання складних систем, створення гнучких алгоритмів підтримки прийняття рішень на основі зрозумілих людні наборів правил, можливість обробки неточної та неповної інформації [4]. У [5] розглянуто напрям створення інтелектуальних систем підтримки інженерних рішень для складних нелінійних електроенергетичних об'єктів з використанням математичного апарату штучного інтелекту. Виконано розробку програмного забезпечення для автоматизованого моніторингу залишкового ресурсу механічного обладнання прокатних станів [6]. Виміри показали, що реакція частоти обертання двигуна є сильною інформативною ознакою для визначення часу запізнювання реакції ділянок лінії привода поряд з сигналами вібрації і сигналом давача тиску в системі гідро-рівноважування валків.

У статті [7] розроблено систему моніторингу та діагностики стану на основі LabVIEW, яка використовується для діагностики товщини смуги шляхом аналізу різних параметрів. Стаття [8] фокусується на системі моніторингу для високошвидкісного прогону дроту, що складається з системи об'єму процесу та системи моніторингу вібрації на основі точності діагностики несправностей та вимог зниження енергії для високошвидкісного дротяного стану, і система забезпечить стабільну роботу обладнання та знизити споживання енергії. Основна мета консультативної системи [9] полягає в тому, щоб допомогти оператору налаштувати параметри промислового процесу, що регулюються вручну, з метою досягти необхідної якості продукції. Ця діагностика призначена для розпізнавання несправності процесу, яку неможливо легко виявити шляхом аналізу лише окремих сигналів, а натомість має бути задіяний аналіз у багатовимірному просторі даних. У статті [10] використовується база даних при розробці модельного прогностичного алгоритму для ідентифікації вільного ходу в електромеханічних приводах польоту. У роботі [11] здійснюється високоточна валідація цифрового двійника та створення експериментальної бази даних для електромеханічних приводів з урахуванням несправностей.

Для підвищення ефективності використання діагностичного обладнання найбільш доцільним є його використання для аналізу обладнання різного призначення за параметрами, що збережені у файлах та архівах у вигляді певної бази даних [12].

Розробка систем безперервного моніторингу та діагностики технічного стану електрообладнання металургійного підприємства є основним напрямком проектування інтелектуальних інформаційних систем для промислових підприємств [13]. В даній роботі представлено метод діагностики обладнання за змінною струму двигуна. У цьому документі [14] пропонується метод, що аналізує крутний момент навантаження та зміну швидкості двигуна в клітях приводів

чорнового та чистового стану відповідно до сталі, яку потрібно прокатувати. Результати можуть бути використані як частина експертної системи для автоматичної оцінки споживання електроенергії на стані гарячої прокатки.

Отже, параметри, за якими проводять моніторинг та діагностику прокатного обладнання умовно можна розділити на механічні та електричні, але в більшості випадків вони досить сильно взаємопов'язані один з одним. З огляду на розглянуті вище джерела, можна дійти висновку, що при розробці систем моніторингу та діагностики варто віднести до основних електромеханічних параметрів силу прокатки, струм і напругу двигуна, частоту обертання, момент навантаження. Досить часто для перевірки працездатності запропонованих систем діагностики та моніторингу використовуються певні математичні та комп'ютерні моделі обладнання [14-16]. Перспективними напрямками розвитку цих систем є використання баз даних систем моніторингу та експертних знань у системах прийняття рішень для обслуговуючого персоналу, а також елементів штучного інтелекту для систем автоматичного контролю технологічного процесу.

III. МЕТА РОБОТИ

Удосконалити систему діагностики стана холодної прокатки на основі бази даних його електромеханічних процесів, шляхом розробки нечіткої системи прийняття рішення про стан електроприводів прокатного стана, що підвищить ефективність існуючої системи діагностики.

IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГУ МАТЕРІАЛУ І АНАЛІЗ ОТРИМАННИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Сучасне металопрокатне виробництво характеризується інтенсифікацією навантажень на технологічне обладнання. У цих умовах зростає роль різних систем автоматичного діагностування, контролю та регулювання, що забезпечують підвищення продуктивності та якості продукції, що випускається. На сьогоднішній день з'являється все більше нових мікропроцесорних систем, які дозволяють діагностувати та передавати для аналізу різні сигнали по інформаційних каналах.

Для вирішення завдання вимірювання електромеханічних параметрів дресировального одноклітинного стану холодної прокатки цеху холодної прокатки №1 ВАТ «Запоріжсталь» використовується багатоканальний комплекс, який призначений для моніторингу та архівування отриманих даних. Схему розміщення обладнання показано на рисунку 1, де Р – розмотувач (розмотувальний пристрій); К – кліт з натискними пристроями; М – моталка (намотувальний пристрій); РД – редуктори двигунів розмотувального та намотувального механізмів, кліті; Д - двигуни електроприводів розмотувального механізму, кліті та намотувального механізму; ω_1 , ω_2 – кутові швидкості розмотувача та моталки; V1, V2 - лінійні швидкості сму-

ги на вході та на виході кліті.

Комплекс використовує інформацію, отриману від датчиків швидкості, струму та напруги. По кожному з чотирьох електроприводів [32, 33] контролюються такі координати: напруга двигуна, струм збудження, струм якоря, а також швидкість кліті, яка береться з урахуванням калібрувального коефіцієнта пропорційно до напруги тахогенератора.

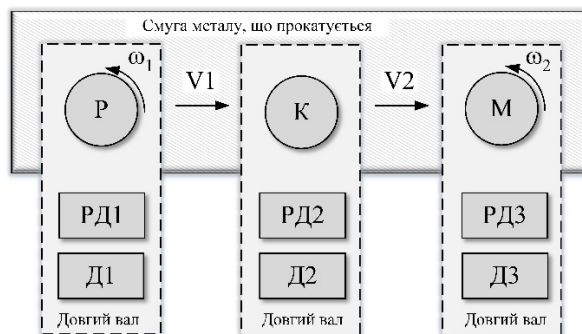


Рисунок 1. Схема розміщення обладнання прокатного стану

Програмне забезпечення комплексу було спеціально розроблене на базі вбудованої системи мікроконтролера КПС19-06. Розроблена програма дозволяє вводити необхідні назви каналів, калібрувати канали, змінювати параметри графіків. Для налаштування зображення графіків у програмі передбачено можливість зміни кольору, товщини ліній графіка; для зручності дослідження кривих може відображатися сітка та задаватися її крок; для дослідження графіків у загальному вигляді (без відображення впливу шумів на сигнал) передбачено функцію усереднення значень. Функціями інформаційно-вимірювального комплексу є прийом інформації про напругу, швидкість і струм двигунів прокатної кліті, моталки і розмотувача; візуалізація отриманої інформації у числовій формі та формі тимчасових діаграм. У пам'яті промислового комп'ютера зберігаються також база даних налаштування стану, щоденні звіти по роботі та файли тимчасових діаграм, записаних автоматично. На персональному комп'ютері проводиться обробка щоденних звітів та зареєстрованих діаграм. Отримані дані аналізуються, з них робляться висновки, які дозволяють вносити коригування в налаштування та функціонування окремих вузлів залежно від якості отриманої продукції та від вихідного продукту. Таким чином, створюється досить ґрунтовна база даних прокатки кожного рулону щодня, яка доступна як у графічному відображенні, так і у табличному, що розширює можливість використання та аналізу отриманих даних.

На рисунку 2 наведено електромеханічні процеси (1 - напруга кліті, 2 - напруга моталки, 3 - струм якоря розмотувача, 4 - напруга розмотувача, 5 - струм кліті, 6 - швидкість кліті) при прокатуванні смуги в нормальному режимі. На рисунку 3 наведено аналогічні

криві для випадку з аварією – обривом смуги.

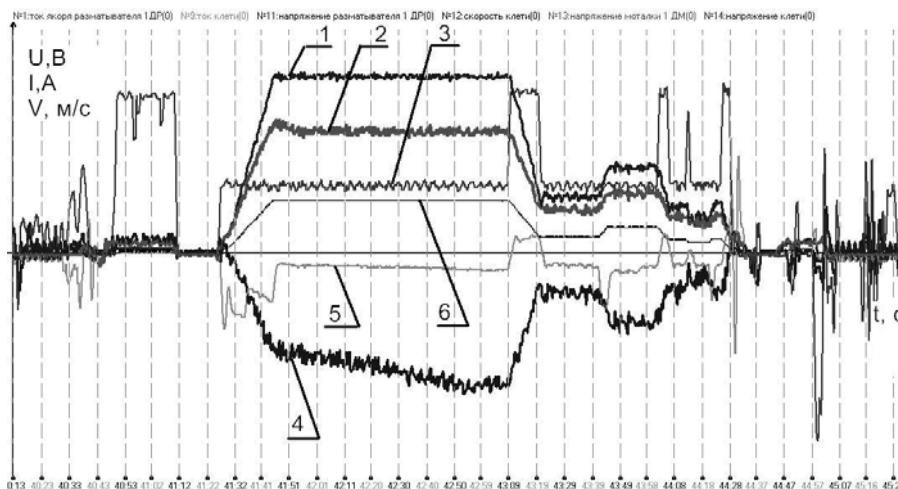


Рисунок 2. Графіки електромеханічних процесів при нормальній прокатці рулону

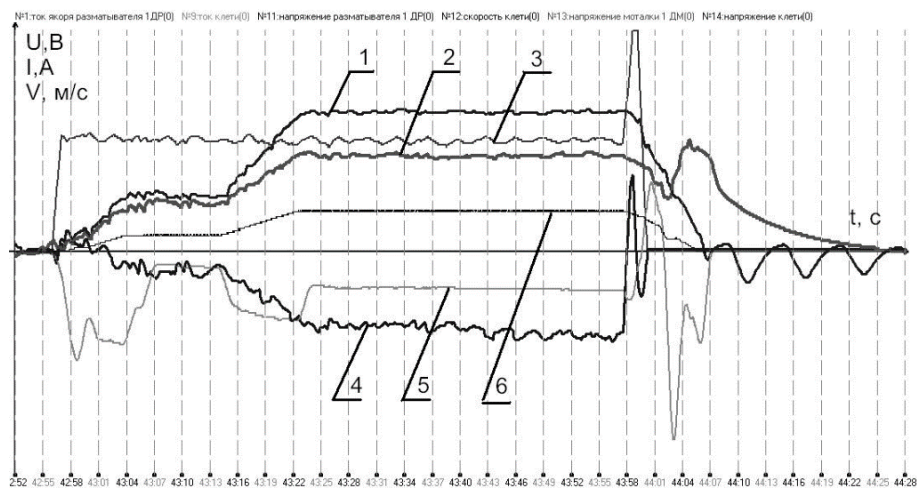


Рисунок 3. Графіки електромеханічних процесів при аварійній прокатці – обрив смуги

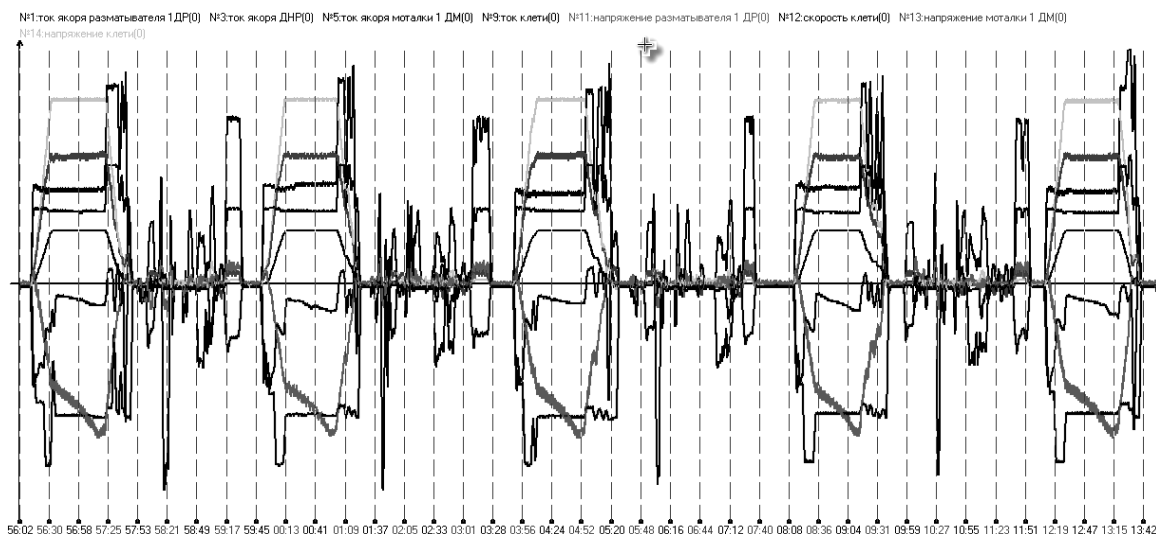


Рисунок 4. Графіки електромеханічних процесів при прокатці п'яти рулонів

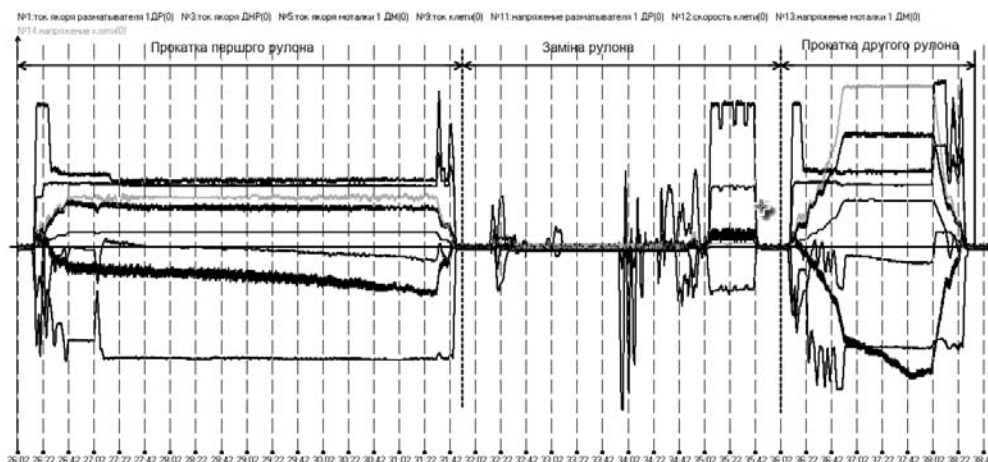


Рисунок 5. Графіки електромеханічних процесів при прокатці на різних швидкостях

Графічний редактор відображення електромеханічних процесів дозволяє легко редагувати виведення на екран контрольованих величин та часу, за допомогою чого можна одночасно бачити кілька однотипних операцій (наприклад, прокатка п'яти рулонів показана на рис. 4), що дозволяє аналізувати швидкість та темп прокатки, завантаженість обладнання. Типовий нормальний режим прокатки одного рулону містить основні режими роботи стану, а саме робота на заправній швидкості (заправка смуги), розгін до робочої швидкості, прокатка при стабільній робочій швидкості, гальмування і робота на зниженій швидкості, зміна рулону. Струм якоря моталки побічно характеризує натяг смуги. Співвідношення діючих струмів на тяжких роликів, кліт і моталки показує залежність між переднім та заднім натягом. Розглянувши режими роботи приводів можна визначити динамічну і статичну складові струмів і моментів. З рисунку 5 видно, що зі збільшенням значення швидкості смуги зменшується час прокатки, оскільки показані графіки отримані для двох однакових рулонів.

Результати розробки та аналізу одержаних результатів моніторингу показали напрями досліджень, у яких можна виділити такі основні етапи: аналіз технологічного обладнання; виявлення «проблемних» режимів; дослідження режимів прокатки та їх удосконалення. За допомогою цього моніторингу можна оптимізувати налаштування систем керування як окремими каналами регулювання, так і багатопараметричною системою загалом.

У своїй більшості електромеханічні, електротехнічні та електроенергетичні об'єкти представляють собою нелінійні та взаємопов'язані системи, що обумовлює складність регулювання процесів, які в них виникають. Проблеми ефективного керування зазначеними об'єктами набувають усе більшої актуальності, відносяться до числа фундаментальних науково-технічних проблем. Відомо, що класичні методи керування ефективні для обмеженої низки об'єктів, або для об'єктів, до яких застосовані певні спрощення при

математичному описі цього об'єкта [5]. Серед найпоширеніших проблем застосування традиційних методів управління можна виділити такі: використання лінійних регуляторів для об'єктів з нестабільними станами, навантаженнями, нелінійностями, збурення; фіксованість параметрів регуляторів; робота в екстремальних режимах; параметрична невизначеність електроенергетичної системи, тощо. Більшість із цих проблем можна вирішувати, застосовуючи синергетичні алгоритми керування, нечіткі нейронні мережі і методи нечіткої логіки.

Актуальність використання принципів штучного інтелекту в електроенергетичних системах полягає в забезпеченні необхідного рівня обміну інформацією між складовими елементами системи на основі інтелектуальних методів. На теперішній час одним із шляхів розв'язання задачі побудови ефективної автоматичної системи керування або прийняття рішення є використання інтелектуальних методів на основі математичного апарату нечіткої логіки, які реалізують керування на основі експертних відомостей і не потребують математичного опису поведінки системи [5]. Нечітка логіка дає можливість широко використовувати експертні знання при побудові систем прийняття рішень та систем автоматичного керування завдяки наявності розмитих в кількісному відношенні параметрів. Тому при розробці систем управління об'єктами, що складно формалізуються, доцільно застосовувати моделі та методи на принципах нечіткої логіки [18]. Такі ситуації мають місце при наявності участі операторів у функціонуванні технологічного об'єкта або за відсутності точних знань щодо цього об'єкта керування.

Об'єктом удосконалення існуючого інформаційно-вимірювального діагностичного комплексу є ділянка розмотувальний механізм – прокатна кліть. Основною задачею удосконалення є розробка системи діагностики, яка попереджатиме про передаварійний стан щодо обриву смуги металу, що прокатується. Інші дефекти та ділянки прокатного стану не розгля-

даються.

На основі аналізу результатів моніторингу електромеханічних процесів дресировального одноклітьового стана 1700 ПАТ «Запоріжсталь» [16] виявлено, що умови, при яких відбувається обрив смуги, виникають при різкому зниженні напруги кола якоря приводного двигуна розмотувального механізму, різкому збільшенні струму якорного кола цього ж двигуна. Під різким збільшенням та зменшенням мається на увазі період часу 1-1,5 с, за які відбувається стрибок у 2-2,5 рази. Такі зміни значень електромеханічних процесів є передумовами до такої ж різкої зміни натягу смуги, що прокатується, тому пропонується додати до параметрів, які беруть участь у діагностиці, ще один – натяг смуги. Для отримання вимірювальної інформації про силу натягу пропонується використати непрямий метод вимірювання, скориставшись відомими виразами для її знаходження [17,18]:

$$\begin{cases} F_C(p) = \frac{C_p}{p} \{v_r(p) - [1 + \varepsilon(p)] \cdot v_{kl}\}; \\ \varepsilon(p) = \frac{l}{C_p \cdot l} \cdot F_C(p); \\ v_r(p) = R_p \cdot \omega_l(p); \\ v_{kl}(p) = R_{kl} \cdot \omega_2(p), \end{cases} \quad (1)$$

де F_C - сила натягу смуги металу, що прокатується; C_p - жорсткість пружної ланки (смуги металу, що прокатується); v_r, v_{kl} - лінійні швидкості смуги металу на виході з розмотувального механізму та прокатної кліті; ε - відносне подовження смуги металу; l - відстань між осями розмотувального механізму і прокатної кліті; R_p - радіус розмотувального механізму; R_{kl} - радіус прокатної кліті; ω_r, ω_{kl} - кутові швидкості розмотувального механізму та прокатної кліті.

Радіус прокатної кліті має постійне значення і не змінюється під час технологічного процесу. Радіус розмотувального механізму змінюється у процесі прокатки, що обумовлене зменшенням радіуса рулона, який встановлено на барабан розмотувального механізму.

Радіус рулона можна знайти за формулою [16]:

$$R_p = \sqrt{R_b^2 + \frac{h}{\pi} \int_0^t v_r dt}, \quad (2)$$

де R_b - радіус барабана розмотувального механізму.

Зв'язок між радіусом рулона та швидкістю перемотки може бути встановлений, якщо записати вираз для зміни об'єму рулона ΔV_p за час t , впродовж якого радіус рулона змінюється від R_p до R_b . [16]

$$\Delta V_p = \pi \cdot (R_p^2 - R_b^2) \cdot b, \quad (3)$$

де b - ширина смуги металу, що прокатується.

Таким чином, для побудови елемента удосконалення системи діагностики пропонується скористатися засадами нечіткої логіки. На вході цієї нечіткої системи прийняття рішення про об'єкт діагностування було задано наступні значення: напруга якорного кола двигуна розмотувального механізму; струм якорного кола двигуна розмотувального механізму; натяг смуги металу, що прокатується, на ділянці між розмотувачем та прокатною кліттю. На виході отримано загальний стан системи, який напряму залежить від значень вхідних даних [18]. На рисунку 6 показано загальний вигляд розробленої нечіткої системи.

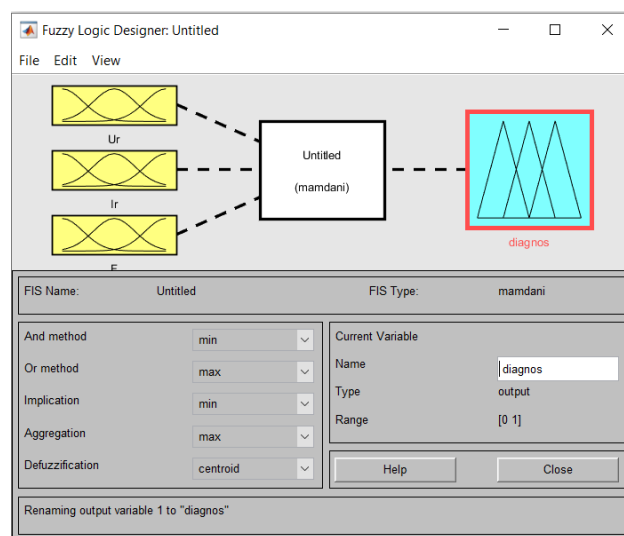


Рисунок 6. Загальний вигляд розробленої нечіткої системи

Далі для кожної з вхідних змінних, а також для виходу створено функції приналежності. Для входів і виходів було обрано функції типу «trimf», адже вона дозволяє досить просто візуально показати зміну значень. Далі встановлено межі значень, в яких очікуються коливання вхідних і вихідних даних [18].

Згідно технологічної інструкції номінальний струм якорного кола складає 1100 А, номінальна напруга якорного кола складає 600 В, максимальна сила натягу 1500 Н. Регулювання кутової швидкості електропривода розмотувального механізму може здійснюватися у двох зонах: перша зона – збільшенням напруги якорного кола до номінального значення, друга зона – ослабленням магнітного потоку. При номінальному навантаженні електропривод повинен вийти на номінальні значення напруги. Зменшені значення напруги не можна віднести до неправильної роботи електропривода, тому що може здійснюватися прокатка при зниженій швидкості при заправці смуги металу у валки суміжних електроприводів, а також підвищення швидкості до робочої з подальшим гальмуван-

ням та дотягуванням смуги. Аналогічним чином варіюються значення струму якірного кола розмотувального механізму. Допустимими при роботі електропривода вважаються значення з нуля до номінального значення струму, проте при розгоні і гальмуванні треба враховувати динамічну складову, яка є припустимою у межах близько 1,5-2 рази від номінального значення. Максимальне припустиме значення струму обумовлюється двократним перевищенням номінального значення і розраховується при виборі захисного обладнання від перевищення пускових струмів. Сила натягу регламентується діаграмою натягу смуги металу, що прокатується. Ця діаграма має декілька ділянок. Перша ділянка має лінійний характер та називається зоною пружності, тут смуга металу підлягає закону Гука. Друга ділянка – невелика горизонтальна пряма, називається зоною загальної текучості, тут відбувається суттєва зміни довжини смуги без суттєвого збільшення навантаження. Третя зона – зона зміцнення, тут подовження смуги супроводжується зростанням навантаження, але більш повільним, ніж на пружній ділянці. Найвища точка кривої цієї діаграми – це співвідношення максимальної сили, яку здатна витримати смуга металу, до його початкової площі поперечного перетину, має назву межі міцності. Остання ділянка кривої – відповідає руйнуванню властивостей металу та руйнуванню смуги металу, що відповідає розриву смуги.

Проаналізувавши електромеханічні процеси двох взаємопов'язаних електроприводів розмотувального механізму і приводної кліти, для входів було призначено межі, а саме для напруги розмотувального механізму (U_r) від 0°V до 600°V :

- менше 200°V – напруга низька;
- від 200°V до 620°V – напруга в нормі;
- від 620°V до 700 V – напруга вище норми.

Для струму якірного кола розмотувального механізму від 0 A до 2200 A :

- від 0 A до 1100 A – струм в нормі;
- від 1100 A до 1600 A – струм підвищений;
- від 1600 A до 2200 A – струм високий.

Для натягу смуги металу, що прокатується від 0 H до 1500 H :

- від 0 H до 1200 H – натяг менше норми;
- від 1200 H до 1500 H – натяг в нормі;
- від 1500 H – натяг перевищує норму.

Для загального стану системи було умовно встановлено шкалу від 0 до 1 :

- від 0 до $0,3$ – відмінний стан (excellent);
- від $0,3$ до $0,8$ – нормальний стан (normal);
- від $0,8$ до 1 – перед аварійний стан (bad).

Функції приналежності напруги, струму, натягу, а також кінцевого стану системи зображені відповідно на рисунках 7 – 10.

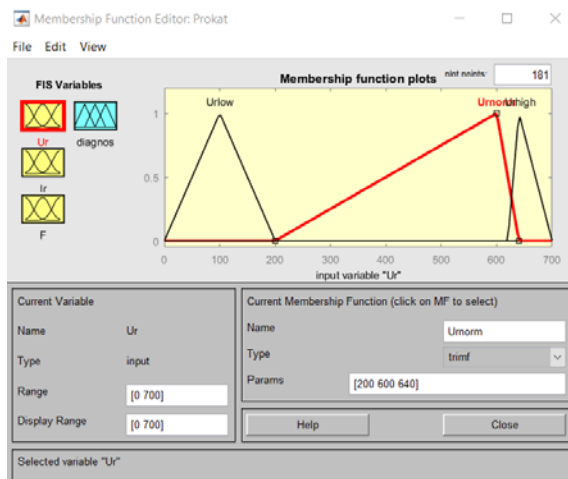


Рисунок 7. Функції приналежності напруги розмотувального механізму

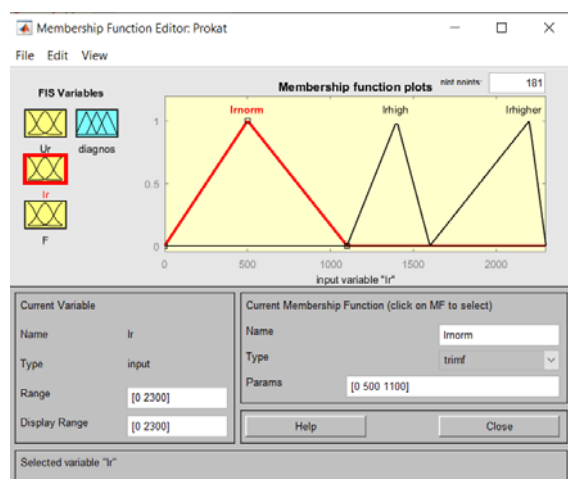


Рисунок 8. Функції приналежності струму якірного кола розмотувального механізму

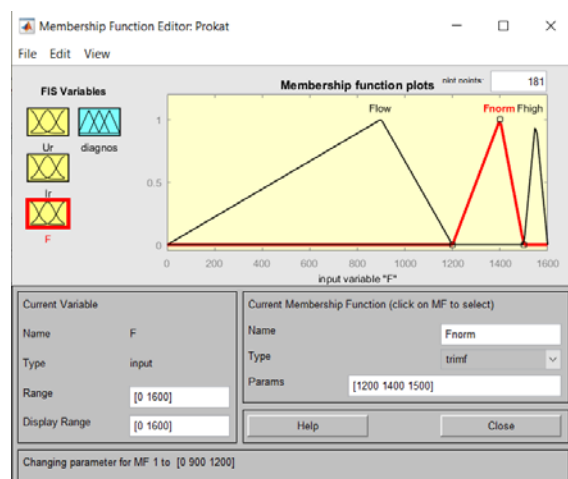


Рисунок 9. Функції приналежності натягу смуги металу, що прокатується, на ділянці між розмотувальним механізмом і прокатною кліткою

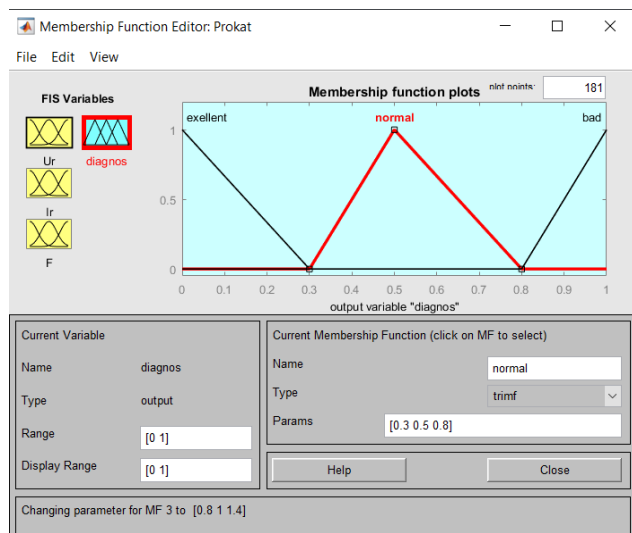


Рисунок 10. Функції приналежності стану системи

З використанням заданих функцій приналежності розроблено базу нечітких правил. Для побудови цієї бази правил використовують модель типу «якщо – то», за допомогою якої встановлюються зв'язки між вхідними та вихідними параметрами системи.

Основне призначення бази нечітких правил – це передати у формальній формі знання експертів або результати експериментів, які отримані емпіричним шляхом, у певній проблемній області.

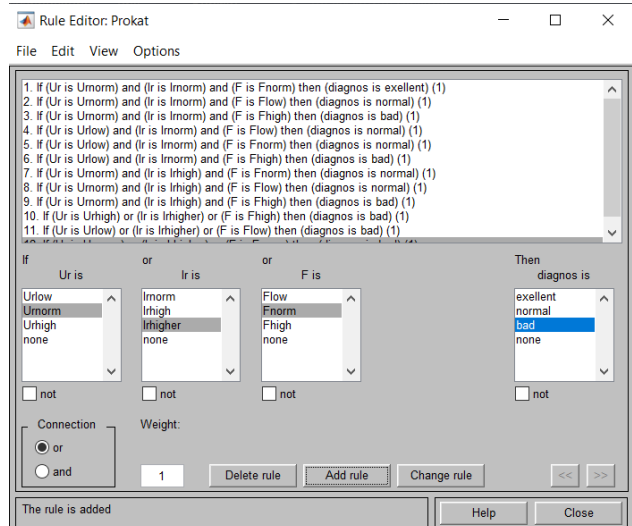


Рисунок 11. Перелік правил у вікні редактора правил Fuzzy Matlab

Для підтвердження правильності роботи створеної нечіткої системи, представлено таблицю даних з результатами моделювання (табл. 1), використовуючи графічне зображення нечіткого виводу моделі прийняття рішень щодо стану двох взаємопов'язаних електроприводів (розмотувального механізму та прокатної кліти) стана холодної прокатки.

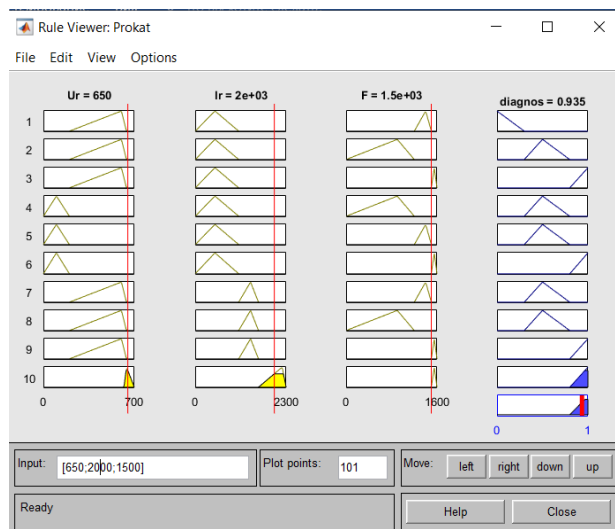


Рисунок 12. Графічне зображення нечіткого виводу моделі прийняття рішень щодо стану двох взаємопов'язаних електроприводів (розмотувального механізму та прокатної кліти) стана холодної прокатки

Таблиця 1. Результати моделювання нечіткої системи

Вхідні значення			Вихідне значення
Напруга якірного кола (Ur), В	Струм якірного кола (Ir), А	Натяг смуги металу (F), Н	Стан системи (diagnos), у.о.
100	500	1570	0.928
660	1400	1570	0.857
600	1400	1400	0.653
500	1000	1500	0.523
600	1100	1400	0.289
200	1100	1400	0.587
300	1100	1200	0.551
600	2000	1400	0.839
600	2290	1400	0.812
670	2290	1400	0.847
690	2290	1580	0.858
650	2000	1500	0.935

Отже, в результаті верифікації елемента прийняття рішення на базі нечіткої логіки удосконаленої автоматизованої системи моніторингу та діагностики електромеханічних процесів стана холодної прокатки, було змодельовано різні ситуації з вхідними та вихідними даними і зроблено висновок про те, що система працює коректно, відповідно до встановлених вимог, а також до розробленої бази нечітких правил.

V. ВИСНОВКИ

Удосконалено систему діагностики електромеханічних процесів стану холодної прокатки шляхом її доповнення нечіткою системою прийняття рішення про об'єкт діагностування на основі бази даних електромеханічних процесів двох взаємопов'язаних електродвигунів: розмотувального механізму і прокатної кліти. На вході цієї системи задано напругу якорного кола двигуна розмотувального механізму, струм якорного кола двигуна розмотувального механізму, натяг смуги металу, що прокатується, на ділянці між розмотувачем та прокатною кліткою. На виході отримано загальний стан системи, який напряму залежить від значень вхідних даних.

Для отримання вимірювальної інформації про параметри діагностування використовуються дані давачів струму та напруги, які вже встановлені на промисловому обладнанні цеху холодної прокатки №1 ПАТ «Запоріжсталь». Інформацію про значення сили натягу смуги металу, що прокатується можна отримати як шляхом встановлення додаткових вимірювальних пристроїв, так і непрямим шляхом, використовуючи математичні моделі поточного радіуса рулона та лінійної швидкості смуги металу.

Проведене моделювання системи прийняття рішень про стан об'єкта діагностики на базі нечіткої логіки з урахуванням різних ситуацій з вхідними та вихідними даними показало, що система працює коректно, відповідно до встановлених вимог, а також до розробленої бази нечітких правил і може бути використана для діагностики передаварійного стану, пов'язаного з обривом смуги металу, що прокатується.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Грабовський, Г.Г. Системи контролю та діагностики в інтегрованих АСУ товстолістовими станами [Текст] / Г.Г. Грабовський, М.Г. Ієвлев, С.С. Мойсеєнко // Математичні машини і системи, 2021. - № 4. - С.58-69. DOI: 10.34121/1028-9763-2021-4-58-69
- [2] Мещанінов, С.К. Діагностика автоматизованих систем прокатних станів з використанням нейронної мережі [Текст] / С.К. Мещанінов, О.В. Сай, В.В. Багрій, Р.В. Волошин // Математичне моделювання, 2020. - № 1(42). - С. 78-84.
- [3] Баглай, А.В. Вибрационное обследование стана 1150 [Текст] / А.В. Баглай // Техническая диагностика и неразрушающий контроль, 2017. - № 1. - С. 54-57. <https://doi.org/10.15407/tdnk2017.01.09>
- [4] Шушура, О. М. Методологічні основи побудови інформаційних технологій для автоматизації управління складними системами на принципах нечіткої логіки [Текст] : дис. докт. техн. таук : 05.13.06 : захищена 11.03.18 : утв. 24.09.18 / Шушура Олександр Миколайович. - Київ, 2018. - 322 с.
- [5] Кирик, В.В. Математичний апарат штучного інтелекту в електроенергетичних системах: підручник [Текст] / В.В. Кирик. - Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2019. - 224 с.
- [6] Крот, П.В. Методи і технічні засоби автоматизованого моніторингу динамічних навантажень та діагностики зносу ліній приводу прокатних станів [Текст] / П.В. Крот, В.В. Вереньов // 36. статей проектів за програмою «РЕСУРС» НАН України, 2009. - С. 123-129.
- [7] Yue, W. The Design and Application of Distributed Mill's Monitoring and Diagnostic System Base on LabVIEW / W. Yue, G. Shengfeng, S. Lin // Electrical and Control Engineering, International Conference. - Wuhan, China, 2010. - pp. 2295-2298. doi: 10.1109/iCECE.2010.566
- [8] Liang, S. Research and Application of Monitoring System for High-speed Wire Running / S. Liang, et al. // 2014 Sixth International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation. - Shangshai, China, 2011. - pp. 1019-1022. doi: 10.1109/ICMTMA.2011.536
- [9] Puchr, I. Probabilistic advisory system for operators can help with diagnostics of rolling mills / I. Puchr, P. Herout // 2017 21st International Conference on Process Control (PC), 2017. - pp. 132-136. doi: 10.1109/PC.2017.7976202.
- [10] Rito, G. Di. Model-Based Prognostic Health-Management Algorithms for the Freeplay Identification in Electromechanical Flight Control Actuators / G. Di Rito, F. Schettini, R. Galatolo // 2018 5th IEEE International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace), Rome, Italy, 2018, pp. 340-345, doi: 10.1109/MetroAeroSpace.2018.8453552.
- [11] Baldo, L. High-Fidelity Digital-Twin Validation and Creation of an Experimental Database for Electromechanical Actuators Inclusive of Failures / L. Baldo, M. Bertone, M. D. L. Dalla Vedova, P. Maggiore, // 2022 6th International Conference on System Reliability and Safety (ICSRS), Venice, Italy, 2022, pp. 19-25, doi: 10.1109/ICSRS56243.2022.10067403.
- [12] Rednikov, S. N. Experience in Using Combined Diagnostic Systems for Assessing State of Metallurgical Equipment / S. N. Rednikov, E. N. Akhmedyanova and D. M. Zakirov // 2018 Global Smart Industry Conference (GloSIC), 2018. - pp. 1-6. doi: 10.1109/GloSIC.2018.8570148.
- [13] Karandaev, A. S. Design of Smart Technical Condition Analysis Systems for Electric Equipment of an Iron-and-Steel / A. S. Karandaev, R. G. Mugalimov, M. Y. Petushkov, S. I. Lukyanov, A. S. Sarvarov // 2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), 2019. - pp. 448-453. doi: 10.1109/URALCON.2019.8877612.

- [14] Orcajo, G. A. Dynamic Estimation of Electrical Demand in Hot Rolling Mills / G. A. Orcajo et al. // IEEE Transactions on Industry Applications, 2016. - Vol. 52. - No. 3. - pp. 2714-2723. doi: 10.1109/TIA.2016.2533483.
- [15] Назарова, Е. С. К вопросу разработки систем диагностирования электромеханических систем станов холодной прокатки [Текст] / Е. С. Назарова // Електротехніка та електроенергетика. – 2013. – № 1. – С. 36-41. DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2013-1-6>
- [16] Sadovoi, O. Modeling and research of electromechanical systems of cold rolling mills. Monograph. / O. Sadovoi, O. Nazarova, V. Bondarenko, A. Pirozhok, T. Hutsol, T. Nurek, Sz. Glowacki – Krakow: Traicon, 2020. – 138 p.
- [17] Назарова, О.С. Нечітка логіка в системі моніторингу та діагностики електромеханічних процесів стану холодної прокатки / О. С. Назарова, Б. В. Васильєв // Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості. Збірник тез доповідей Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених і студентів, Івано-Франківськ, 13 жовтня 2022 р. [Електронний ресурс] - Івано-Франківськ : ВНЗ Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, 2022. – С. 151-152.
- [18] Nazarova, O. S. Monitoring of electromechanical processes of the cold rolling mill taking into account the variation of the inertia moment / O.S. Nazarova, B.V. Vasiliev, M.S. Punda // International scientific conference «Interaction between science and technology in modern conditions»: conference proceedings (November 3–4, 2022. Riga, the Republic of Latvia). Riga, Latvia : “Baltija Publishing”, 2022. - P. 50-54. <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-264-7-12>

Стаття надійшла до редакції 10.01.2023

IMPROVEMENT OF THE COLD ROLLING MILL DIAGNOSTIC SYSTEM BASED ON THE DATA BASE OF ITS ELECTROMECHANICAL PROCESSES

- NAZAROVA O.S. Candidate of Technical Science, Associate professor, Associate professor of the department of electric drive and automation of industrial equipment, Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine, e - mail: nazarova16@gmail.com;
- VASYLIEV B.V. Master of the department of electric drive and automation of industrial equipment, Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine, e - mail: vasbohdan@gmail.com
- SHOKUROV D.R. Student of the department of electric drive and automation of industrial equipment, Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine, e - mail: daniishokurov03@gmail.com

Purpose. To improve the diagnostic system of the cold rolling mill based on the database of its electromechanical processes, by developing a fuzzy decision-making system as to the condition of the rolling mill electrical drives, which will increase the efficiency of the existing diagnostic system.

Methodology. Mathematical and computer modeling.

Findings. A fuzzy decision-making system about the state of two interconnected electric drives of the unwinding mechanism and the rolling mill has been developed to investigate and prevent the pre-emergency state associated with the break of the rolling metal strip. The specified decision-making system is built on the basis of a database of electromechanical processes of electric drives of the skin-threat single-celled state of cold rolling of the cold rolling shop No. 1 of PJSC "Zaporizhstal". At the input of this system, the voltage of the armature circuit of the unwinding mechanism motor, the armature circuit current of the unwinding mechanism motor, the tension of the rolled metal strip in the area between the unwinder and the rolling cage are set. At the output, the general state of the system is obtained, which depends on the values of the input data. Information on the value of the tensile strength of the rolled metal strip can be obtained on the basis of the pressure data and voltage sensors, which are installed on industrial equipment. Information about the value of the tension force of the rolled metal strip can be obtained both by installing additional measuring devices and indirectly, using mathematical models of the roll current radius and the linear speed of the rolled metal strip.

Originality. The system for diagnosing the condition of cold rolling has been improved by introducing a fuzzy decision-making system into its composition based on a database of electromechanical processes of the electric drives of the unwinding mechanism and the cage, which will allow to prevent an emergency condition caused by a break in the

rolled metal strip.

Practical value. Prevention of breaking of the rolled metal strip on the basis of an improved system for diagnosing the state of cold rolling, which uses information from the database of its electromechanical processes in order to improve the efficiency of the product quality management process. Using complete organized information and experience of operating a cold rolling mill, you can form technical and technological solutions for the modernization of existing and development of new technological equipment and systems for automatic control of electric drives of rolling mills.

Keywords: diagnostics; database; electromechanical processes; cold rolling mill; fuzzy logic; transient process; modeling.

REFERENCES

- [1] Hrabovskiy, H.H., Ievliev M.H., Moiseienko S.Ie. (2021). Systemy kontroliu ta diahnostryky v intehrovanykh ASU tovstolystovymy stanamy [Control and diagnostic systems in integrated ACS by thick-sheet mills]. *Mathematical machines and systems*, 4, 58-69. DOI: 10.34121/1028-9763-2021-4-58-69 (in Ukrainian)
- [2] Meshchaninov, S.K., Sai, O.V., Bahrii, V.V., Voloshyn, R.V. (2020). Diahnostryka avtomatyzovanykh system prokatnykh staniv z vykorystanniam neironnoi merezhi [Diagnostics of automated systems of rolling mills using a neural network]. *Mathematical modeling*, 1(42), 78-84. (in Ukrainian)
- [3] Bahlai, A.V. (2017). Vybratsyonnoe obsledovanye stana 1150 [Vibration inspection of mill 1150]. *Technical diagnostics and non-destructive testing*, 1, 54–57. <https://doi.org/10.15407/tdnk2017.01.09> (in Russian)
- [4] Shushura, O. M. (2018). Metodolohichni osnovy pobudovy informatsiinykh tekhnolohii dlia avtomatyzatsii upravlinnia skladnymy systemamy na pryntsyypakh nechitkoi lohiky [Methodological foundations of the construction of information technologies for the automation of management of complex systems based on the principles of fuzzy logic] : dys. dokt. tekhn. nauk : 05.13.06 : zakhyshchena 11.03.18 : утв. 24.09.18 / Shushura Oleksii Mykolaiovych. - Kyiv, 322. (in Ukrainian)
- [5] Kyryk, V.V. (2019). Matematychnyi aparat shtuchnoho intelektu v elektroenerhetychnykh systemakh: pidruchnyk [Mathematical apparatus of artificial intelligence in electric power systems]. *K. Politehnika*, 224. (in Ukrainian)
- [6] Krot, P.V., Verenov, V.V. (2009). Metody i tekhnichni zasoby avtomatyzovanoho monitorynhu dynamichnykh navantazhen ta diahnostryky znosu linii pryvodu prokatnykh staniv [Methods and technical means of automated monitoring of dynamic loads and diagnostics of wear of rolling mill drive lines]. *Zb. statei proektiv za prohramoiu «RESURS» NAN Ukrainy*, 123-129. (in Ukrainian)
- [7] Yue, W., Shengfeng, G., Lin, S. (2010). The Design and Application of Distributed Mill's Monitoring and Diagnostic System Base on LabVIEW. *Electrical and Control Engineering, International Conference*. Wuhan, China, 2295-2298. doi: 10.1109/iCECE.2010.566
- [8] Liang, S. (2011). Research and Application of Monitoring System for High-speed Wire Running. *Sixth International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*. Shangshai, China, 1019-1022. doi: 10.1109/ICMTMA.2011.536
- [9] Puchr, I., Herout, P. (2017). Probabilistic advisory system for operators can help with diagnostics of rolling mills. *21st International Conference on Process Control (PC)*, 132-136. doi: 10.1109/PC.2017.7976202.
- [10] Rito, G. Di, Schettini, F., Galatolo, R. (2018). Model-Based Prognostic Health-Management Algorithms for the Freeplay Identification in Electromechanical Flight Control Actuators. *5th IEEE International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace)*, Rome, Italy, 340-345, doi: 10.1109/MetroAeroSpace.2018.8453552.
- [11] Baldo, L., Bertone, M., Dalla, M. D. L. (2022). Vedova and P. Maggiore, "High-Fidelity Digital-Twin Validation and Creation of an Experimental Database for Electromechanical Actuators Inclusive of Failures. *6th International Conference on System Reliability and Safety (ICSRS)*, Venice, Italy, 19-25, doi: 10.1109/ICSRS56243.2022.10067403.
- [12] Rednikov, S. N., Akhmedyanova, E. N., Zakirov D. M. (2018). Experience in Using Combined Diagnostic Systems for Assessing State of Metallurgical Equipment. *Global Smart Industry Conference (GloSIC)*, 1-6. doi: 10.1109/GloSIC.2018.8570148.
- [13] Karandaev, A. S., Mugalimov, R. G., Petushkov, M. Y., Lukyanov, S. I., Sarvarov, A. S. (2019). Design of Smart Technical Condition Analysis Systems for Electric Equipment of an Iron-and-Steel. *International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*, 448-453. doi: 10.1109/URALCON.2019.8877612.
- [14] Orcajo, G. A. (2016). Dynamic Estimation of Electrical Demand in Hot Rolling Mills. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 52, 3, 2714-2723. doi: 10.1109/TIA.2016.2533483.
- [15] Nazarova, O. S. (2013). K voprosu razrabotky system dyahnostyrovanya elektromekhanicheskyykh system stanov kholodnoi prokatky [On the issue of developing systems for diagnosing electromechanical systems of cold rolling mills]. *Electrical engineering and power engineering*, 1, 36-41. DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2013-1-6>
- [16] Sadovoi, O., Nazarova, O., Bondarenko, V., Pirozhok A., Hutsol, T., Nurek, T., Glowacki, Sz. (2020). Modeling and research of electromechanical systems of cold rolling mills. *Krakow, Traicon*, 138.
- [17] Nazarova, O. S., Vasyliiev, B. V. (2022). Nechitka lohika v systemi monitorynhu ta diahnostryky elek-

tromekhanichnykh protsesiv stanu kholodnoi prokatky [Fuzzy logic in the system for monitoring and diagnosing electromechanical processes of the cold rolling state. Abstracts of the All-Ukrainian scientific and practical conference of young scientists and students on Information technologies in education, technology and industry, 151-152. (in Ukrainian)

[18]Nazarova, O. S., Vasyliiev, B.V., Punda, M.S. (2022). Monitoring of electromechanical processes of the cold rolling mill taking into account the variation of the inertia moment. International scientific conference on Interaction between science and technology in modern conditions, Riga, Latvia, 50-4. <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-264-7-12>

УДК 621.31

ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ ГАРМОНІЧНИХ КОМПОНЕНТІВ ПОТУЖНОСТІ В СИЛОВІЙ СХЕМІ ДИНАМІЧНОГО ВІДНОВЛЮВАЧА НАПРУГИ

- БЕЗЗУБ М.А. аспірант кафедри електротехніки Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського, Кременчук, Україна, e-mail: bezzubmax@gmail.com;
- БЯЛОБРЖЕСЬКИЙ О.В. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електротехніки Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського, Кременчук, Україна, e-mail: seemal@kdu.edu.ua;
- ТОДОРОВ О.В. аспірант кафедри електротехніки Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського, Кременчук, Україна, e-mail: olehtodorov@gmail.com.

Мета роботи. Дослідження розподілу гармонічних компонентів потужності в силовій схемі динамічного відновлювача напруги.

Методи дослідження. На підставі диференціальних рівнянь кіл силових схем динамічного відновлювача виконано пошук зв'язку параметрів режиму з параметрами елементів схеми. На основі отриманих виразів використовуючи методи математичного моделювання в середовищі візуального програмування створено модель динамічного відновлювача напруги.

Отримані результати. Отримані рівняння, які відбивають зв'язок параметрів режиму динамічного відновлювача напруги з параметрами елементів схеми. В результаті моделювання режиму з різними гармонійними складом струму та напруги виявлені особливості розподілу компонентів миттєвої потужності.

Наукова новизна. Встановлено, що наявність різних гармонік струму та напруги, які діють в трансформаторі динамічного відновлювача, викликає додаткові гармоніки потужності, які трансформуються в обмотках. Відмічено, що низькочастотні гармоніки потужності LC-фільтра домінують на конденсаторі, який паралельно підключений до обмотки трансформатора, в той же час рівень високочастотних складових, зумовлених ШІМ-модуляцією, для конденсатора і дроселя фільтра відрізняються незначно. Компоненти потужності нульової частоти накопичуючого конденсатора відповідає потроєній компоненті потужності нульової частоти на виході перетворювача, що зумовлено його роботою на три фази. Це не можна повсюдити на другу та третю гармоніки потужностей перетворювача та конденсатора, в останньому ці складові відсутні, що зумовлено енергообмінними процесами між фазами перетворювача.

Практична цінність. За допомогою отриманих виразів сформульовано принцип визначення параметрів елементів силових схем динамічного відновлювача напруги, зокрема накопичувальних елементів.

Ключові слова: Динамічний відновлювач напруги; гармонічні спотворення; вольтодобудатний трансформатор; потужність гармонік.

І. ВСТУП

З розвитком енергетики збільшується кількість споживачів електроенергії, які являють собою нелінійне навантаження та спричиняють погіршення якості електроенергії. Такими навантаженнями є електроприводи змінного та постійного струму зі змінною швидкістю, різні системи освітлення, електроживлення промислових устаткувань та багато іншого. Подібні пристрої споживають від мережі несинусоїдальний струм, що призводить до певних негативних наслідків. Негативна дія нелінійного навантаження полягає в тому, що воно призводить до несинусоїдальності, несиметрії, коливань та відхилень напруги. І таким чином впливають на якість електричної енергії яку отримують інші споживачі [1].

Найбільш ефективними технічними рішеннями

для корекції якості електроенергії в трифазній мережі змінної напруги є керовані фільтрокомпенсуючі пристрої, до яких можна віднести динамічний відновлювач напруги. Можливості динамічного відновлювача напруги дозволяють використовувати його для вирішення більшості завдань покращення якості електроенергії – фільтрація гармонік напруги, регулювання напруги, балансування несиметрії напруги, зниження дози флікери та інші [2].

Оскільки динамічний відновлювач напруги працює в умовах відхилення різних показників якості електричної енергії [3] то й кожен з елементів пристрою повинен відповідати певним вимогам. Розробки подібних пристроїв обмежені функціонально по причині складності розподілу гармонічних компонентів потужності в силовій частині динамічного відновлювача напруги.

II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

У сфері дослідження функціонування динамічного відновлювача напруги існує досить багато робіт. Дослідження та всебічний огляд топології динамічного відновлювача напруги на основі перетворювачів потужності та методів керування виконаний в роботі [4]. Автори порівнюють сучасні джерела та дослідження з питань якості електроенергії, принцип дії динамічних відновлювачів напруги разом із його режимами роботи, компонентами фільтра, топологією пристрою для зберігання енергії, топології динамічних відновлювачів напруги на основі одно-/трифазних перетворювачів живлення та топології на основі блоків керування, які мають різні методи обробки керування. Крім того, модифіковані та покращені конфігурації фільтрокомпенсуючого пристрою. В роботі автори обмежуються узагальненими рівняннями.

У роботі [5] представлена електромагнітна модель динамічного відновлювача напруги на базі силової електроніки. За допомогою програмного забезпечення імітується робота пристрою лише протягом часу відхилення напруги від номінального значення. Результати роботи показують, що провал напруги майже повністю зменшується, а середньоквадратична напруга на чутливому навантаженні підтримується на рівні приблизно 90% від номінального значення. Зосереджуючись на процесах відновлення в мережевому колі досліджуваної системи, автори не розкрили зв'язок зазначених процесів з процесами в елементах силової частини пристрою.

У роботі [6] проаналізовано роботу динамічного відновлювача напруги при провалах мережевої напруги, перенапругах та дисбалану. За показником загальних гармонійних спотворень (THD) напруги та струму мережі досліджено напругу навантаження з урахуванням її несиметрії. Результати вказують на досить високу ефективність компенсаційних властивостей динамічного відновлювача напруги. Недоліком використовуваного методу є визначення напруги компенсації за функцією струму, що може призвести до некоректної роботи комплексу силового активного фільтра в умовах спотворення струму. Спотворення напруги автори створюють штучно, вводячи 5-ту та 7-му гармоніки, як і в роботі [7]. Але як показано в роботі [8] в певних випадках ці спотворення більш складні і на їх усунення впливають параметри елементів силової частини пристрою.

Дослідження методу проектування параметрів вихідного фільтра каскадного динамічного відновлювача напруги на основі Н-мосту, застосовуваного в розподільній мережі середньої напруги, проведено в роботі [9]. Результати моделювання показують, що оптимальний вибір параметрів фільтра повністю відповідає вимогам продуктивності системи, а також зменшує вартість і розмір динамічного відновлювача напруги. Але автори не показали роботу комплексу при різних показниках відхилення якості електричної

енергії, таких як несинусоїдальність та несиметрія. Суттєвим недоліком запропонованого рішення є те, що навантаження прийняте лінійним та незмінним у часі. За рахунок послідовно ввімкненої ємності це може мати вплив на показники якості.

У статті [10] проводять оптимізацію функції діапазону значень індуктивності та ємності LC-фільтрів в структурі динамічного відновлювача напруги. Також аналізуються зміни параметрів за різних умов провалів напруги та коефіцієнтів потужності. Крім того, також пропонується оптимізований метод проектування з урахуванням багатьох факторів впливу. Представлено детальну процедуру оптимізації, а її достовірність підтверджена результатами моделювання. Обидва результати показують, що запропонований метод може покращити конструкцію LC-фільтра для динамічного відновлювача напруги на основі каскадного Н-мосту підвищити продуктивність усієї системи. Але отримані результати не можуть бути поширені на більш широкий спектр відхилення якості електричної енергії та нелінійне навантаження.

Таким чином аналіз існуючих робіт показав, що автори робіт виконують дослідження динамічного відновлювача напруги в рамках сприйняття пристрою як цілісного. Зв'язок параметрів схеми з параметрами режиму та, зокрема, потужністю залишається не дослідженим.

III. МЕТА РОБОТИ

Дослідження розподілу гармонічних компонентів потужності в силовій схемі динамічного відновлювача напруги.

IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГУ МАТЕРІАЛУ І АНАЛІЗ ОТРИМАННИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Дослідження роботи всіх елементів динамічного відновлювача напруги є досить складним процесом, оскільки динамічний відновлювач напруги працює в умовах відхилення різних показників якості електричної енергії. Такими відхиленнями є перенапруга, провали напруги, несиметрія та несинусоїдальність. В таких умовах кожен з елементів динамічного відновлювача напруги повинен забезпечувати ефективну роботу на широкому спектрі коригувальних величин. Оскільки в кожному елементі силової схеми, зважаючи на спотворення напруги мережі, відбувається розподіл гармонічних компонентів струму та напруги, то вони в свою чергу визначають розподіл гармонічних компонентів потужності. Силова частина динамічного відновлювача напруги складається з вольтододачного трансформатора, згладжуючого LC фільтра, транзисторного перетворювача та конденсатора в колі постійної напруги (рис.1).

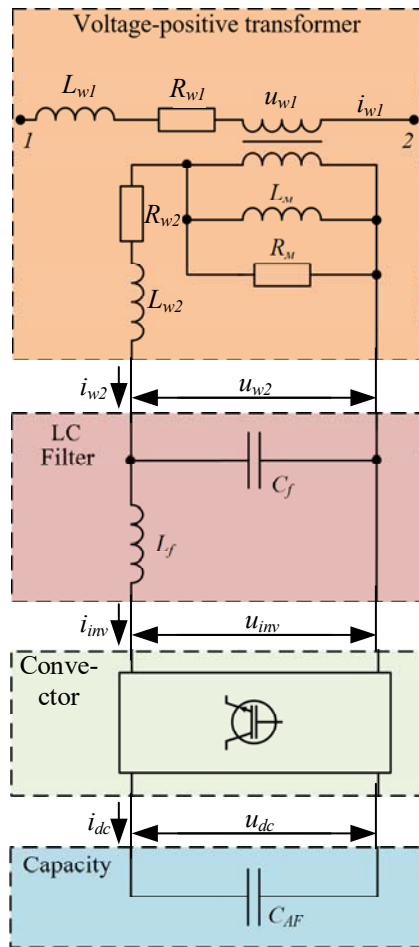


Рисунок 1. Силова частина динамічного відновлювача напруги (однофазне виконання)

Вибір вольтодатного трансформатора слід виконувати за необхідними параметрами, а саме номінальна потужність, номінальна вихідна напруга та номінальний вихідний струм.

Роботу трансформатора в будь-якому режимі характеризують основні рівняння, до яких відносять рівняння МРС (магніторухливих сил) та рівняння рівноваги напруг для кіл первинної та вторинної обмоток [11].

Розглянемо ці рівняння на прикладі двообмоткового однофазного трансформатора. Ці рівняння справедливі для кожної фази трифазного трансформатора, якщо він навантажений симетричним навантаженням.

За другим законом Кірхгофа для магнітного кола трансформатора справедливо наступне рівняння МРС:

$$i_{w1}w_1 + i_{w2}w_2 = i_{\mu}w_1 \quad (1)$$

де w_1, w_2 – число послідовно з'єднаних витків первинної та вторинної обмоток; i_{w1}, i_{w2} – струм первинної та вторинної обмоток; i_{μ} – струм намагнічування.

Магнітне поле трансформатора, як відзначалося, доцільно представити з наступних магнітних потоків:

Φ_{μ} – основний магнітний потік; $\Phi_{\sigma w1}$ – магнітний потік розсіювання первинної обмотки; $\Phi_{\sigma w2}$ – магнітний потік розсіювання вторинної обмотки.

Потік Φ_{μ} практично рівномірно розподіляється по перетину сердечника трансформатора та зчеплений в однаковому ступені як з первинною, так і з вторинною обмотками. Він індукуює в цих обмотках ЕРС, миттєві значення яких визначається рівняннями:

$$e_{w1} = -w_1 \frac{d\Phi_{\mu}}{dt} = -\frac{d\Psi_{w1\mu}}{dt} \quad (2)$$

$$e_{w2} = -w_2 \frac{d\Phi_{\mu}}{dt} = -\frac{d\Psi_{w2\mu}}{dt} \quad (3)$$

де $\Psi_{w1\mu}, \Psi_{w2\mu}$ – потокозчеплення первинної та вторинної обмоток трансформатора, відповідно, з основним магнітним потоком.

Потоки розсіювання $\Phi_{\sigma w1}$ та $\Phi_{\sigma w2}$ індукують, відповідно, в первинній та вторинній обмотках ЕРС:

$$e_{w1} = -L_{w1} \frac{di_{w1}}{dt} \quad (4)$$

$$e_{w2} = -L_{w2} \frac{di_{w2}}{dt} \quad (5)$$

де L_{w1} і L_{w2} – індуктивності розсіювання первинної та вторинної обмоток, відповідні потокам розсіювання цих обмоток.

З огляду на вищевикладене, запишемо рівняння рівноваги напруг для первинної та вторинної обмоток трансформатора по другому закону Кірхгофа. Для первинної обмотки

$$u_{w1} = \frac{d\Psi_{w1}}{dt} + i_{w1}R_{w1} \quad (6)$$

де Ψ_{w1} – повне потокозчеплення первинної обмотки як з потоком Φ_{μ} так і з потоком $\Phi_{\sigma w1}$.

Для вторинної обмотки

$$u_{w2} = \frac{d\Psi_{w2}}{dt} + i_{w2}R_{w2} \quad (7)$$

де Ψ_{w2} – повне потокозчеплення вторинної обмотки трансформатора як з потоком Φ_{μ} так і з потоком $\Phi_{\sigma w2}$; u_{w2} – миттєві значення напруги вторинної обмотки.

Вплив параметрів трансформатора на напруги/струми залежно від частоти зручно розглянути за схемою заміщення (рис.2).

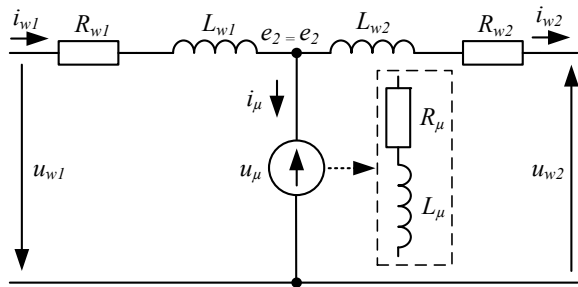


Рисунок 2. Схема заміщення трансформатора

струм вторинної обмотки відомі то для визначення невідомих струму первинної обмотки та напруги вторинної можна представити трансформатор як чотириполюсникта використати G – форму запису рівнянь чотириполюсника [8]. Для розрахунку параметрів G -форми запису рівнянь чотириполюсника використовуємо вираз у комплексній формі який пов’язує напругу вторинної обмотки \dot{U}_{w2} з напругою первинної \dot{U}_{w1} на струмом вторинної обмотки \dot{I}_{w2} :

$$\dot{U}_{w2} = \dot{G}_{21TV} \dot{U}_{w1} + \dot{G}_{22TV} \dot{I}_{w2}, \quad (8)$$

За умови що напруга первинної обмотки та де G – параметри визначаються як:

$$\dot{G}_{21TV} = - \frac{R_\mu \cdot L_\mu \cdot j\omega}{-\omega^2 \cdot L_\mu \cdot L_{w1} + j\omega(L_{w1} \cdot R_\mu + L_\mu \cdot R_{w1} + L_\mu \cdot R_\mu) + R_{w1} \cdot R_\mu} \quad (9)$$

$$\dot{G}_{22TV} = \frac{(R_{w1} + L_{w1}j\omega) \cdot (R_\mu \cdot L_\mu j\omega)}{R_\mu \cdot L_\mu j\omega + (R_{w1} + L_{w1}j\omega)(R_\mu + L_\mu j\omega)} + (k^2 R_{w2} + k^2 L_{w2} j\omega) \quad (10)$$

Для визначення характеру зазначених параметрів при зміні частоти використовуємо наступні дані трансформатора [7], такі як опір первинної обмотки $R_{w1} = 0.677$ Ом, опір вторинної обмотки $R_{w2} = 0.227$ Ом, опір намагнічування $R_\mu = 21.361$ Ом, індуктивність первинної обмотки $L_{w1} = 0.353$ мГн, індуктив-

ність вторинної обмотки $L_{w2} = 0.1183$ мГн, індуктивність намагнічування $L_\mu = 0.881$ Гн, коефіцієнт трансформації $k = 1.7$. За принципом незначущості скорочуємо вираз 18 до вигляду

$$\dot{G}'_{22TV} = \frac{-L_{w1} \cdot L_\mu \cdot R_\mu \cdot \omega^2 + L_\mu \cdot R_{w1} \cdot R_\mu j\omega}{R_{w1} \cdot R_\mu - L_{w1} \cdot L_\mu \omega^2 + R_\mu \cdot L_{w1} j\omega + R_\mu \cdot L_\mu j\omega + R_{w1} \cdot L_\mu j\omega} + (k^2 R_{w2} + k^2 L_{w2} j\omega) \quad (11)$$

Попередній аналіз показав, що параметр \dot{G}_{21TV} суттєво не залежить від частоти. Для визначення впливу частоти на \dot{G}_{22TV} розраховано АЧХта

ФЧХ(рис.2). Для перевірки коректності виразу (11) побудовано порівняльні частотні характеристики двох параметрів залежності від номеру гармоніки h .

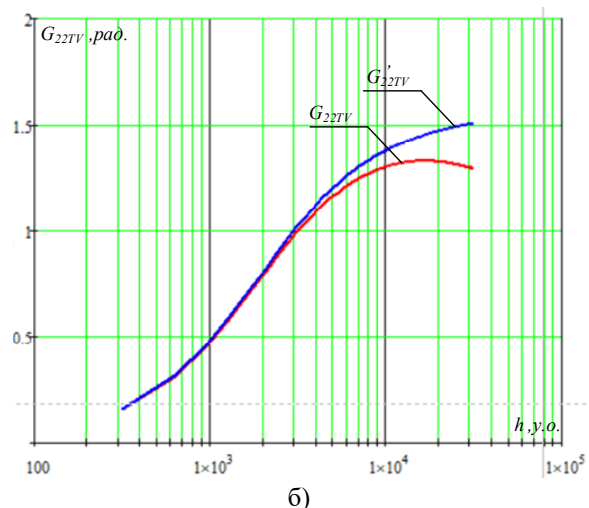
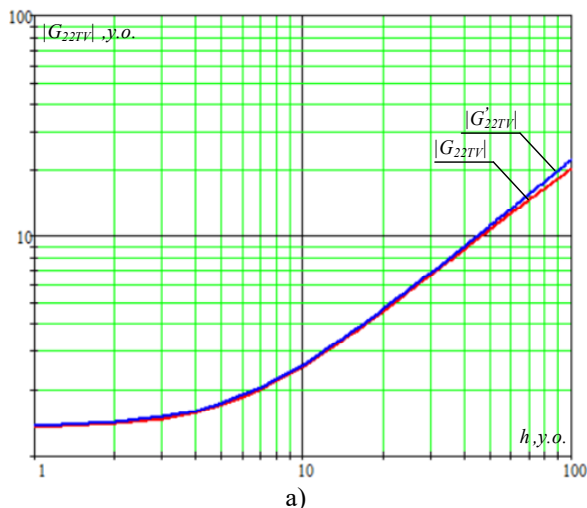


Рисунок 3. Частотні характеристики а) АЧХ \dot{G}_{22TV} б) ФЧХ \dot{G}_{22TV}

Припустимо, що пристрій працює у мережі $U_{мер} = U_{w2} = 10$ кВ. В такій мережі допускається

відхилення напруги у 10%. Прийємо відхилення рівня напруги 20%. Отже напруга компенсації може

становити $U_{\text{ком}} = 2000$ В. Таким чином напруга вторинної обмотки вольтоподатного трансформатора приймається $U_{w2} = U_{\text{ком}} = 2$ кВ. Можливо два варіанти вибору трансформатора в залежності коефіцієнта трансформації k . Припустивши що $k > 1$, маємо співвідношення $U_{w2} < U_{w1}$ та $I_{w2} > I_{w1}$ що при струмові навантаженні в десятки або сотні ампер призведе до збільшення струму вторинної обмотки. Це призведе до економічних витрат на дровове з'єднання та збільшення втрат потужності в силовій частині динамічного відновлювача напруги. Якщо використовувати $k < 1$, маємо співвідношення $U_{w2} > U_{w1}$ та $I_{w2} < I_{w1}$, що призводить до збільшення напруги на вторинній обмотці трансформатора. Це в свою чергу призведе до збільшення вимог до ізоляції елементної бази та збільшення втрат потужності зумовлених опором та індуктивністю трансформатора.

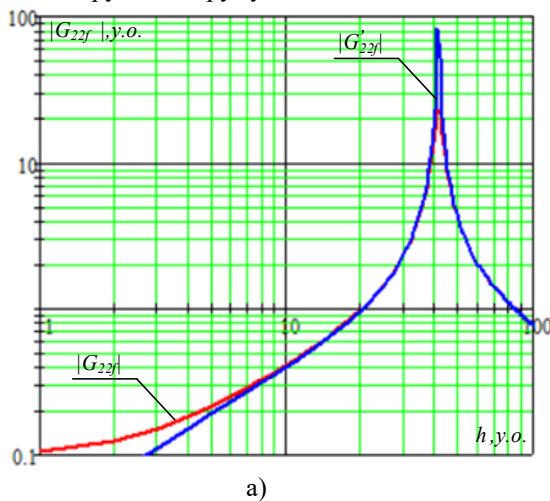
Наступним елементом силової схеми динамічного відновлювача напруги є згладжуючий LC фільтр [12]. Для вибору параметрів фільтра слід враховувати напругу, струм та частоту комутації ШІМ. Роботу та вибір параметрів LC фільтра можна описати за допомогою наступних рівнянь.

$$\dot{U}_{Cf} = \dot{G}_{21f} \dot{U}_{inv} + \dot{G}_{22f} \dot{I}_{w2} = \frac{1}{1 - L_f C_f \omega^2 + j R_f C_f \omega} \dot{U}_{inv} - \frac{L_f \omega + R_f}{1 - L_f C_f \omega^2 + j R_f C_f \omega} \dot{I}_{w2} \quad (24)$$

Для визначення залежності параметрів \dot{G}_{21f} та \dot{G}_{22f} від частоти використано наступні параметри елементів: опір індуктивності $R_f = 0.1$ Ом, індуктивність $L_f = 0.1183$ мГн, ємність конденсатора фільтра

$$\dot{U}_{Cf} = \dot{G}'_{21f} \dot{U}_{inv} + \dot{G}'_{22f} \dot{I}_{w2} = \frac{1}{1 - L_f C_f \omega^2} \dot{U}_{inv} - \frac{L_f \omega}{1 - L_f C_f \omega^2} \dot{I}_{w2} \quad (25)$$

Для визначення залежності вихідної напруги від вхідної напруги та струму навантаження в залежності



а)

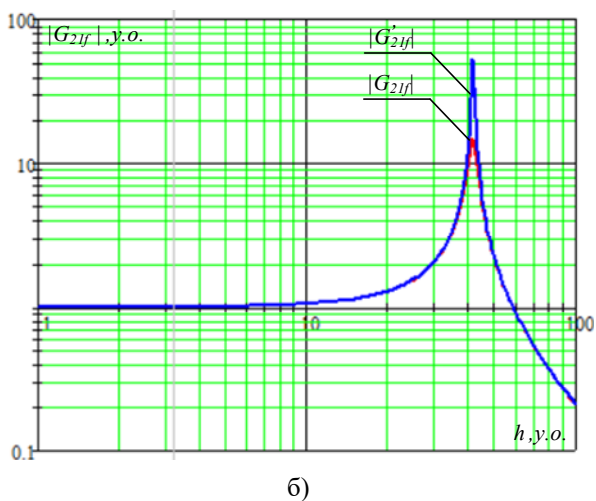
де u_{inv} – напруга на виході інвертора; u_{Lf} – напруга індуктивності LC – фільтра; i_{Lf} – струм індуктивності LC – фільтра; u_{Cf} – напруга на конденсаторі LC – фільтра; i_{Cf} – струм конденсатора LC – фільтра; L_f – індуктивність LC – фільтра; R_f – опір індуктивності LC – фільтра; C_f – ємність конденсатора LC – фільтра.

При виборі LC фільтра одним з основних параметрів є частота комутації ШІМ [13].

В роботі [8] отримано зв'язок вихідної напруги фільтра із вхідною напругою та струмом з використанням перетворення Лапласа. Для комплексних змінних цей зв'язок має наступний вигляд:

$C_f = 0.05$ мФ. При розрахунках виявлено що опір індуктивності несуттєво впливає на вихідну характеристику тому виконано спрощення виразу за принципом незначущості.

від номеру гармоніки h отримано частотні характеристики (Рис. 3).



б)

Рисунок 4. Амплітудно-частотні характеристики а) \dot{G}'_{22f} б) \dot{G}'_{21f}

З характеристик видно що скорочення не має суттєвого впливу. При збільшенні частоти з нуля до десятої гармоніки АЧХ вихідної напруги від вхідної суттєво не змінюється, далі характеристика стрімко зростає та при 40 гармоніці досягає свого піку що зумовлено точкою резонансу. Далі характеристика стрімко спадає, що вказує на погіршення роботи комплексу при збільшенні частоти вхідної напруги.

Залежність вихідної напруги до струму навантаження має поступове зростання та при 40 гармоніці досягає свого піку що зумовлено точкою резонансу. Далі характеристика стрімко спадає, що вказує на погіршення роботи комплексу при збільшенні частоти струму навантаження.

Наступним елементом силової схеми динамічно-відновлювача напруги є конденсатор кола постійної напруги [14]. Потужність конденсатора можна визначити за допомогою виразу

$$P_{Cdc} = u_{Cdc} \cdot i_{Cdc} = \frac{1}{C_{dc}} \int_0^t i_{Cdc} dt \cdot i_{Cdc} = u_{Cdc} \cdot C_{dc} \frac{du_{Cdc}}{dt} \quad (26)$$

Також потужність конденсатора можна виразити з міркувань балансу потужності на вході та виході перетворювача без урахування втрат:

$$P_{Cdc} = E \cdot i_{Cdc} = i_A u_A + i_B u_B + i_C u_C \quad (27)$$

де E – ЕРС накопичувального конденсатора; i_{Cdc} – струм накопичувального конденсатора; i_A, i_B, i_C – струм кожної фази на виході перетворювача; u_A, u_B, u_C – напруга кожної фази на виході перетворювача.

Якщо заряду накопичувального конденсатора

достатньо для компенсації, а струм конденсатора має постійну та змінну складові, то напруга на конденсаторі буде зменшуватися за лінійним законом відповідно до виразу:

$$u_{Cdc} = \frac{1}{C_{dc}} \int_0^t (-I_0 + I_v \cdot \sin \omega t) dt + U_{max} = U_{max} - \frac{I_0}{C_{dc}} - \frac{I_v \cdot \cos \omega t}{\omega C_{dc}} \quad (28)$$

Для стабільної роботи схеми слід дотримуватися співвідношення при якому напруга на конденсаторі більше амплітуди фазної напруги.

Взявши до уваги вищевказане в середовищі візуального програмування використано модель ділянки електроспоживання з послідовно підключеним динамічним відновлювачем напруги [15] (рисунок 5), яка складається з наступних елементів: джерело напруги $u_s = 380$, навантаження, трансформатор з параметрами опір первинної обмотки $R_{w1} = 0.677$ Ом, опір вторинної обмотки $R_{w2} = 0.227$ Ом, опір намагнічування $R_\mu = 21.361$ Ом, індуктивність первинної обмотки $L_{w1} = 0.353$ мГн, індуктивність вторинної обмотки $L_{w2} = 0.1183$ мГн, індуктивність намагнічування $L_\mu = 0.881$ Гн, коефіцієнт трансформації $k = 1.7$. LC – фільтр з параметрами опір індуктивності $R_f = 0.1$ Ом, індуктивність $L_f = 0.1183$ мГн, ємність конденсатора фільтра $C_f = 0.05$ мФ. Перетворювач напруги та накопичувальний конденсатор напругою $U_C = 1000$ В.

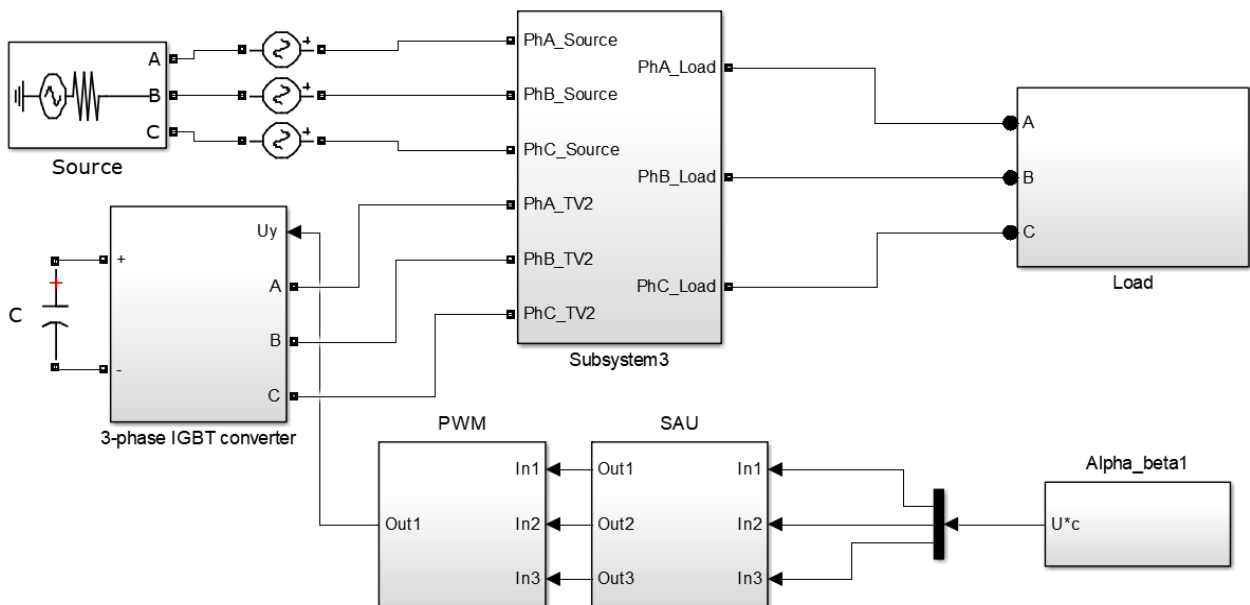


Рисунок 5. Модель ділянки електроспоживання з послідовно підключеним динамічним відновлювачем напруги

Проведено серію експериментів спрямованих на визначення показників потужності кожного з елементів динамічного відновлювача напруги та розподіл потужності в цих елементах. В експерименті імітовано роботу динамічного відновлювача напруги при спотвореній напрузі джерела живлення. Для цього в модель введено елемент який спотворює напругу мережі генеруючи напругу частотою 150 Гц та амплітудою в 10 відсотків від напруги мережі амплітудою 300 В.

Також виконано дослідження з визначення розподілу потужності гармонік в кожному елементі динамічного відновлювача напруги.

В результаті отримані показники потужності на кожному елементів силової схеми динамічного відновлювача напруги. Оскільки розподіл потужності в силовій схемі досить важко розрахувати, використано метод визначення проєкцій вектора потужності кожного елемента динамічного відновлювача напруги в залежності від частоти. Для аналізу обрані: потужність на первинній обмотці трансформатора P_{w1} , потужність вторинної обмотки трансформато-

ра P_{w2} , потужність дроселя LC –фільтра P_{Lf} , потужність конденсатора LC –фільтра P_{Cf} , потужність на виході інвертора P_{mv} , потужність накопичувального конденсатора P_{dc} .

Потужністьна елементах представлена наступним чином:

$$P = u \cdot i = P_h \cdot \sin(\omega_h t - \psi_{ph}) = P_{ah} \cdot \sin(\omega t) + P_{bh} \cdot \cos(\omega t) \tag{29}$$

де $P_{ah} = P_h \cdot \cos \psi_{ph}$ – косинусна складова потужності; $P_{bh} = P_h \cdot \sin \psi_{ph}$ – синусна складова потужності; u – напруга на елементові схеми; i – струм елемента схеми; P_h – потужність гармоніки на елементові схеми; ψ_{ph} – кут початкової фази потужності елемента схеми. На рисунку 6 наведено часові та спектральні діаграми потужності первинної та вторинної обмоток трансформатора.

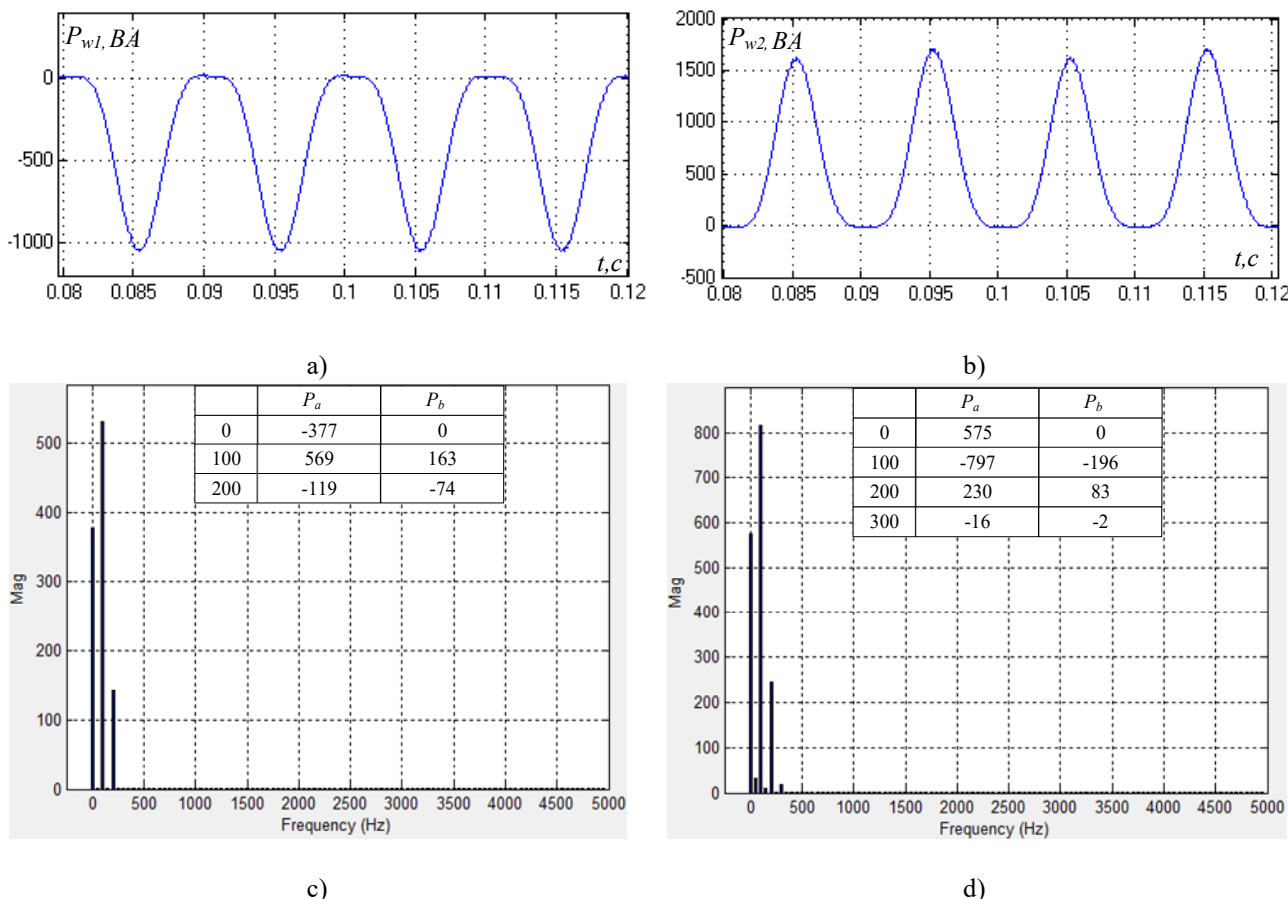


Рисунок 6. Діаграми потужності трансформатора а) часова первинної обмотки; б) часова вторинної обмотки; в) спектральна первинної обмотки; д) спектральна вторинної обмотки

Аналіз спектральних діаграм показав наявність вищих гармонік напруги, що в свою чергу призвело

до виникнення вищих гармонік потужності на первинній обмотці трансформатора (рис. 6с) що в свою

чергу передбачає наявність вищих гармонік на вто-

ринній обмотці трансформатора(рис. 6d).

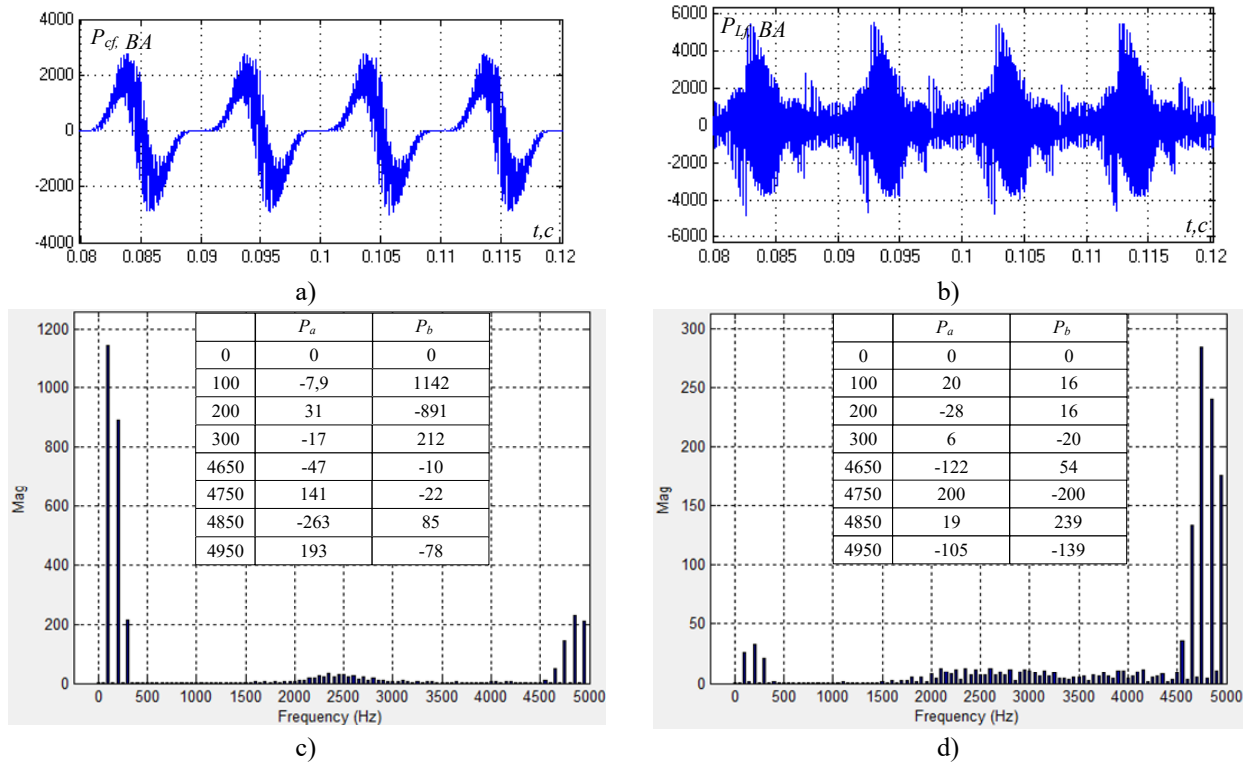


Рисунок 7. Діаграми потужності LC – фільтра а) часова конденсатора; б) часова дроселя; с) спектральна конденсатора; д) спектральна дроселя.

В потужності конденсатора (рис. 7с) домінують компоненти потужності гармонік відповідних потужностей трансформатора. Гармоніки потужності кон-

денсатора та дроселя (рис. 7d) які відповідають частоті модуляції відрізняються незначно, що відповідає фільтраційним властивостям цього кола.

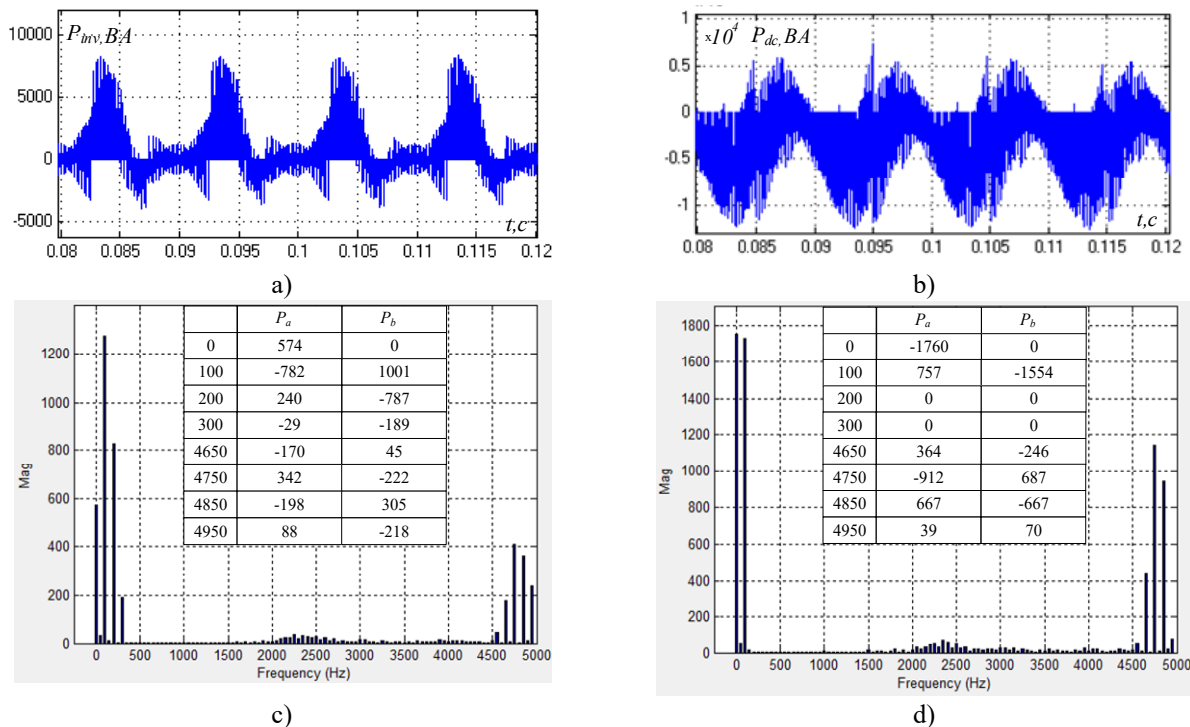


Рисунок 8. Діаграми потужності інвертора а) часова на стороні змінної напруги; б) часова накопичувального конденсатора; с) спектральна на стороні змінної напруги; д) спектральна накопичувального конденсатора

Складові потужності частотою 200 Гц в досліджуваному варіанті на накопичувальному конденсаторі відсутні (рис. 8с), що зумовлено перерозподілом потужності на даній частоті в перетворювачі (рис. 8d).

Складові потужності накопичувального конденсатора зумовлені сумою високочастотних складових

на виході всіх фаз перетворювача.

Для порівняння вище отриманих потужностей синусної та косинусної складової потужності кожного елемента динамічного відновлювача напруги в залежності від частоти внесемо їх до таблиці 1.

Таблиця 1. Значення ортогональних проекцій вектора потужності за гармоніками

Частота	Конденсатор		Вихід перетворювача		конденсатора LC – фільтра		Дросель LC – фільтра		Вторинна обмотка		Первинна обмотка	
	P_a ВА	P_b ВА	P_a ВА	P_b ВА	P_a ВА	P_b ВА	P_a ВА	P_b ВА	P_a ВА	P_b ВА	P_a ВА	P_b ВА
0	-1760	0	574	0	-	-	-	-	575	0	-377	0
100	757	-1554	-782	1001	-7.9	1142	20	16	-797	-196	569	163
200	-	-	240	-787	31	-891	-28	16	230	83	-119	-74
300	-	-	-29	-189	-17	212	6	-20	-16	-2	-	-
4650	364	-264	-170	45	-47	-10	-122	54	-	-	-	-
4750	-912	687	342	-222	141	-22	200	-200	-	-	-	-
4850	667	-667	-198	305	-263	85	19	239	-	-	-	-
4950	39	70	88	-218	193	-78	-105	-139	-	-	-	-

Аналіз частотних характеристик слід проводити починаючи з накопичувального конденсатора оскільки саме він є джерелом живлення динамічного відновлювача напруги. Порядок дослідження частот прийнято від меншої до більшої.

Постійна складова потужності на виході накопичувального конденсатора має значення в 1760 одиниць, на виході перетворювача вона сягає 590. Це зумовлено тим що конденсатор живить три фази одночасно. Далі на дроселі та конденсаторі LC - фільтра постійна складова потужності відсутня. Це може бути спричинене перерозподілом потужністю між частотами. Далі на вторинній обмотці трансформатора потужність становить 580 одиниць, а на первинній обмотці трансформатора, зважаючи на втрати в трансформаторі потужність становить 380 одиниць.

Потужність на частоті 100 Гц становить 1740 одиниць, а на виході перетворювача вже становить 1280. Це може бути спричинене перерозподілом потужності в перетворювачі між фазами та частотами. На дроселі LC – фільтра потужність становить 30 одиниць, а на конденсаторі згладжуючого фільтра 1170, що в сумі, враховуючи втрати, співпадає з цією ж потужністю на виході перетворювача. Далі на вторинній обмотці трансформатора потужність становить 810 одиниць, а на первинній обмотці трансформатора, зважаючи на втрати в трансформаторі потужність на частоті 100 Гц становить 580.

На частоті 200 Гц потужність на виході накопичувального конденсатора відсутня, а от на виході перетворювача вона становить 820 одиниць. Це зумовлено перерозподілом потужністю між частотами. На дроселі LC – фільтра потужність на частоті 200 Гц становить 40 одиниць, а на конденсаторі згладжуючого фільтра 900, що в сумі трохи більше за потужність на виході перетворювача, це спричинене перерозподі-

лом потужністю між частотами. На вторинній обмотці вольтододатного трансформатора потужність на частоті 200 Гц становить 250 одиниць, а на первинній обмотці трансформатора, зважаючи на втрати в трансформаторі потужність становить 150 одиниць.

Потужність на частоті 300 Гц є лише на виході перетворювача та елементах LC – фільтра, що вказує на перерозподілом потужністю між частотами.

На діапазоні частот від 4500 до 5000 Гц потужність на елементах виникає в залежності від частоти модуляції. Але на обмотках трансформатора потужність на цій частоті відсутня, це вказує на те що ця потужність виникла при роботі ШІМ, а LC - фільтр взяв на себе цю потужність.

V. ВИСНОВКИ

Досліджений розподіл гармонічних компонентів потужності кожного елемента динамічного відновлювача напруги. Встановлено що при роботі перетворювача виникають високочастотні компоненти потужності викликані частотою роботи ШІМ, які компенсуються за допомогою LC-фільтра. В потужності конденсатора домінують компоненти потужності гармонік відповідних потужностей трансформатора. Гармоніки потужності конденсатора та дроселя які відповідають частоті модуляції відрізняються незначно, що від-повідає фільтраційним властивостям цього кола. Також виявлено що низькочастотні складові присутні на всіх елементах силової схеми крім накопичувального конденсатора. Причиною цього може слугувати перерозподіл потужності між фазами в перетворювачі. Також встановлено, що рівень потужності гармонійних складових на конденсаторі значно перевищує рівень на виході перетворювача. Це спричинене тим що конденсатор працює відразу на три фази.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] S. Mikkili, A.K. Panda, Power Quality Issues: Current Harmonics, Florida: CRC Press, 2018, p. 160. DOI 10.1201/9781315222479.
- [2] Hirofumi Akagi; Edson Hirokazu Watanabe; Mauricio Aredes, "The Instantaneous Power Theory," in Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning, IEEE, 2017, pp.37-109, doi: 10.1002/9781119307181.ch3.
- [3] Bezzub M., Bialobrzheskyi O., Reva I. & Todorov O. (2021). Series active power filter functioning study under conditions of different indicators of power quality deviation. Reporter of the Priazovskiy State Technical University. Section: Technical sciences. 129-138. 10.32782/2225-6733.43.2021.16
- [4] Moghassemi, Ali & Sanjeevikumar, P.. (2020). Dynamic Voltage Restorer (DVR): A Comprehensive Review of Topologies, Power Converters, Control Methods, and Modified Configurations. Energies. 13. 10.3390/en13164152.
- [5] R. Sedaghati, M. Ghasemi and M. Hayatdavudi, "Performance study of Dynamic Voltage Restorer (DVR) in order to power quality improvement," 2012 Proceedings of 17th Conference on Electrical Power Distribution, 2012, pp. 1-6.
- [6] T. AppalaNaidu, "The Role Of Dynamic Voltage Restorer (DVR) in improving power quality," 2016 2nd International Conference on Advances in Electrical, Electronics, Information, Communication and Bio-Informatics (AEEICB), 2016, pp. 136-141, doi: 10.1109/AEEICB.2016.7538259.
- [7] Bondarenko, S., Bialobrzheskyi, O., & Vlasenko, R. (2018). Investigation of the influence of the transformer of a series active filter on the quality of voltage. Electrical Engineering And Power Engineering, 1, 93-101. doi:http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2018-1-10.
- [8] M. Bezzub, O. Bialobrzheskyi, O. Todorov and I. Reva, "The Effect Frequency Characteristics of the Series Active Filter with a Voltage-positive Transformer Power Circuit on Quality of Filtering," 2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES), Kremenchuk, Ukraine, 2022, pp. 1-5, doi: 10.1109/MEES58014.2022.10005782.
- [9] Yao, Sen & Zhu, Zheng & Zhang, Hua & Cao, Jun & Zhang, Guang. (2014). The Design of Filter Parameters of Dynamic Voltage Restorer in Medium Voltage Network. Applied Mechanics and Materials. 654.
- [10] ChenGuodong, ZhuMiao & Cai Xu. (2014). Parameter Optimization of the LC filters Based on Multiple Impact Factors for Cascaded H-bridge Dynamic Voltage Restorers. Journal of Power Electronics. 14. 10.6113/JPE.2014.14.1.165.
- [11] Sartran Laurent, Barrett Samuel, Kuncoro Adhiguna, Stanojević Miloš, Blunsom Phil & Dyer Chris. (2022). Transformer Grammars: Augmenting Transformer Language Models with Syntactic Inductive Biases at Scale. Transactions of the Association for Computational Linguistics. 10. 1423-1439. 10.1162/tacl_a_00526.
- [12] Vaishnav Navneet, Krishna Bajjuri & Jain Amit. (2022). Inductor Selection, Improved Active Damping and Speed Sensorless Operation Without Voltage Sensors in IM Drive With LC Filter. IEEE Transactions on Power Electronics. 37. 1-10. 10.1109/TPEL.2022.3192117
- [13] Li Guanlin, Amirabadi Mahshid, Chen Xiyu & Lehman Brad. (2022). The Methodology of Constructing the Quadratic Converters. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics. PP. 1-1. 10.1109/JESTPE.2022.3157002
- [14] Chenchireddy Kalagotla & Sreejyothi Khammampati. (2022). Level-Shifted PWM Techniques Applied to Flying Capacitor Multilevel Inverter. 10.1109/ICEARS53579.2022.9752074.
- [15] Bezzub M., Todorov O., Bialobrzheskyi O. & Reva I. (2021). Unified Power Quality Conditioner Electrical Complex for Compensation Influence of Sharply Variable Loading. 222-227. 10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570033.

Стаття надійшла до редакції 18.01.2023

THE POWER HARMONIC COMPONENTS DISTRIBUTION STUDY IN THE POWER CIRCUIT OF A DYNAMIC VOLTAGE RESTORER

BEZZUB M.A.

PhD student at the Department of Electrical Engineering, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University, Kremenchuk,, Ukraine, e-mail: bezzubmax@gmail.com;

BIALOBRZHESKYI O.V.

D., Associate Professor, of the Department of Electrical Engineering, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University, Kremenchuk, Ukraine, e-mail: seemal@kdu.edu.ua;

TODOROV O.V.

PhD student at the Department of Electrical Engineering, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University, Kremenchuk,, Ukraine, e-mail: olehtodorov@gmail.com;

Purpose. Investigation of the distribution of harmonic power components in the power circuit of a dynamic voltage restorer.

Methodology. On the basis of the differential equations of the power circuit of a dynamic restorer, a search for the relationship between the mode parameters and the parameters of the circuit elements is performed. On the basis of the obtained expressions, a model of a dynamic voltage regulator was created using the methods of mathematical modeling in the visual programming environment.

Findings. The equations that reflect the relationship between the mode parameters of a dynamic voltage restorer and the parameters of circuit elements are obtained. As a result of modeling the mode with different harmonic composition of current and voltage, the following features of the distribution of instantaneous power components are revealed.

Originality. It has been established that the presence of different current and voltage harmonics acting in the transformer of a dynamic restorer causes additional power harmonics that are transformed in the windings. It is noted that the low-frequency power harmonics of the LC filter dominate on the capacitor, which is connected in parallel to the transformer winding, while the level of high-frequency components caused by PWM modulation for the capacitor and the filter choke differ slightly. The zero-frequency power component of the storage capacitor corresponds to a tripled zero-time power component at the output of the converter, which is due to its operation in three phases. This cannot be extended to the second and third harmonics of the powers of the converter and the capacitor; these components are absent in the latter, which is due to energy exchange processes between the phases of the converter.

Practical value. Using the obtained expressions, the principle of determining the parameters of the elements of the power circuit of a dynamic voltage restorer, in particular, the storage elements, is formulated.

Keywords: Dynamic voltage restorer; harmonic distortion; voltage transformer; harmonic power; harmonic power.

REFERENCES

- [1] S. Mikkili, A.K. Panda, Power Quality Issues: Current Harmonics, Florida: CRC Press, 2018, p. 160. DOI 10.1201/9781315222479.
- [2] H. Akagi, E. H. Watanabe, M. Aredes, The Instantaneous Power Theory, in Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning, (2017). John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA. doi: 10.1002/9781119307181.ch3.
- [3] 3. Bezzub, M.A. & Bialobrzheskyi, Olexii & Reva, Ihor & Todorov, O.. (2021). Series active power filter functioning study under conditions of different indicators of power quality deviation. Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences. 129-138. 10.32782/2225-6733.43.2021.16
- [4] Moghassemi, Ali & Sanjeevikumar, P.. (2020). Dynamic Voltage Restorer (DVR): A Comprehensive Review of Topologies, Power Converters, Control Methods, and Modified Configurations. Energies. 13. 10.3390/en13164152.
- [5] R. Sedaghati, M. Ghasemi and M. Hayatdavudi, "Performance study of Dynamic Voltage Restorer (DVR) in order to power quality improvement," 2012 Proceedings of 17th Conference on Electrical Power Distribution, 2012, pp. 1-6.
- [6] T. Appala Naidu, "The Role Of Dynamic Voltage Restorer (DVR) in improving power quality," 2016 2nd International Conference on Advances in Electrical, Electronics, Information, Communication and Bio-Informatics (AEEICB), 2016, pp. 136-141, doi: 10.1109/AEEICB.2016.7538259.
- [7] Bondarenko, S., Bialobrzheskyi, O., & Vlasenko, R. (2018). Investigation of the influence of the transformer of a series active filter on the quality of voltage. Electrical Engineering And Power Engineering, 1, 93-101. doi:http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2018-1-10.
- [8] Bezzub, Maksim & Todorov, O. & Bialobrzheskyi, Olexii & Reva, Ihor. (2022). The Effect Frequency Characteristics of the Series Active Filter with a Voltage-positive Transformer Power Circuit on Quality of Filtering.. 10.1109/MEES58014.2022.10005782.
- [9] 3. Yao, Sen & Zhu, Zheng & Zhang, Hua & Cao, Jun & Zhang, Guang. (2014). The Design of Filter Parameters of Dynamic Voltage Restorer in Medium Voltage Network. Applied Mechanics and Materials. 654.
- [10] Chen, Guodong & Zhu, Miao & Cai, Xu. (2014). Parameter Optimization of the LC filters Based on Multiple Impact Factors for Cascaded H-bridge Dynamic Voltage Restorers. Journal of Power Electronics. 14. 10.6113/JPE.2014.14.1.165.
- [11] Sartran, Laurent & Barrett, Samuel & Kuncoro, Adhiguna & Stanojević, Miloš & Blunsom, Phil & Dyer, Chris. (2022). Transformer Grammars: Augmenting Transformer Language Models with Syntactic Inductive Biases at Scale. Transactions of the Association for Computational Linguistics. 10. 1423-1439. 10.1162/tacl_a_00526.
- [12] Vaishnav, Navneet & Krishna Bajjuri, & Jain, Amit. (2022). Inductor Selection, Improved Active Damping and Speed Sensorless Operation Without Voltage Sensors in IM Drive With LC Filter. IEEE Transactions on Power Electronics. 37. 1-10. 10.1109/TPEL.2022.3192117
- [13] Li, Guanlin & Amirabadi, Mahshid & Chen, Xiyu & Lehman, Brad. (2022). The Methodology of Constructing the Quadratic Converters. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics. PP. 1-1. 10.1109/JESTPE.2022.3157002
- [14] Chenchireddy, Kalagotla & Sreejyothi, Khammpati. (2022). Level-Shifted PWM Techniques Applied to Flying Capacitor Multilevel Inverter. 10.1109/ICEARS53579.2022.9752074.
- [15] Bezzub, Maksim & Todorov, O. & Bialobrzheskyi, Olexii & Reva, Ihor. (2021). Unified Power Quality Conditioner Electrical Complex for Compensation Influence of Sharply Variable Loading. 222-227. 10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570033

UDC 621.316

CONTROLLING ELECTRICAL CIRCUIT OF ELECTRIC MOTOR ON IGBT TRANSISTORS

SHISHKIN I.R. Student of the Faculty of Electrical Engineering of the National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: romarioizit7@gmail.com;
LUSHCHIN S.P. Ph.D, Associate professor, Associate professor of the department of physics of the National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: luschin@zntu.edu.ua;

Purpose. Development and analysis of the operation of an electrical circuit for controlling a 700 W direct current electric motor using a contactor on IGBT transistors for operation in diesel locomotives.

Methodology. Analytical and computational methods for developing and analyzing the operation of an electrical circuit using a contactor on IGBT transistors.

Findings. An electrical circuit for controlling a 700 W DC motor using IGBT transistors was developed. The circuit allows you to replace electromagnetic contactors with IGBT transistors to improve the technical characteristics and performance of the electric motor. The use of IGBT transistors allows you to avoid burning of contact groups in comparison with an electromagnetic contactor. A graphical analysis of the transient processes during switching on and off of the electric motor using a circuit based on IGBT transistors was carried out. The analysis of the load characteristic of the electric motor at start-up shows that in the initial section the voltage increases according to a linear law. After the initial increase in voltage, it reaches the set value and the electric motor operates in the operating mode. The analysis of the load characteristics of the electric motor when it is turned off shows, that when the power is turned off, the motor can't stop immediately, as the phenomenon of self-induction occurs. When the external voltage is turned off, its change on the electric motor occurs according to the exponential law. It is shown that for controlling the operation of the electric motor, it is more appropriate to use an electric circuit based on IGBT transistors, which provides conditions for more stable and safe operation of the electric motor. Using the electrical circuit allows you to find quickly malfunctions for their further elimination. The electrical circuit allows you to avoid physical wear of its electrical elements.

Originality. An electrical circuit for controlling an electric motor based on modern electronic components has been developed, which allows the use of IGBT transistors instead of electromagnetic contactors. On the basis of the analytical and calculation method and graphical analysis, the expediency of using IGBT transistors instead of electromagnetic contactors has been proven.

Practical value. The developed electrical circuit can be applied to control a 700 W direct current electric motor for operation in diesel locomotives. The proposed electrical circuit allows to increase the mobility of repairs in the event of a malfunction by replacing the corresponding unit.

Keywords: electric motor control circuit; contactors; IGBT transistors; DC electric motor.

I. I. INTRODUCTION

In modern engineering, different types of switching devices are used: electromagnetic and electronic. The electromagnetic contactor has positive aspects: low price, ease of installation and repair. But it has a number of disadvantages: burning of contacts, electric arc, weakening of the return spring, as a result of which the power contacts are de-energized with a delay, or at all remain under a high current, large weight and size of the contactor, no possibility of operation at high switching frequencies. Today, electronic switches are widely used. For example, modern electronic switches based on IGBT transistors do not have the disadvantages inherent in electromechanical contactors.

II. ANALYSIS OF RESEARCH AND PUBLICATIONS

Electromagnetic contactors are the most common types of switching devices used in modern electrical engineering. Many works describe the principle of operation, types and examples of application in various electrical installations [1] - [5]. Commutation of electric circuits by contacts in electromechanical devices is carried out by closing and opening them. One of the main disadvantages of electromechanical contactors is burning of contacts. In low-voltage devices with operating currents of more than 1000 A and in some types of medium and high-voltage devices (including those with lower operating currents), in addition to the main contacts designed to carry operating currents in the closed state, additional - arcing contacts (arcing) are used in the main circuits contact, on which

an electric arc is established when the electric circuit is opened. The arc extinguishing contact is always electrically parallel to the main contact, and the design of the contact system is built in such a way that the arc extinguishing contact closes before and opens later than the main contact. In the vast majority of switching devices, their main contacts also perform the functions of arc extinguishing contacts [4].

Contact resistance is formed due to two reasons: 1) narrowing or tightening of current lines in the contact zone of contacting parts, and 2) the presence of oxide, sulfide, and other films in the contact zone. The effect of current line contraction on contact resistance is explained by the fact that due to the roughness of contact surfaces (even those that at first glance seem perfectly smooth), the real contact area is one to two orders of magnitude smaller than the imaginary contact area. The effect on the contact resistance of micron-thick films is explained by the fact that these films have a very high specific resistance, which is many orders of magnitude (up to 10^{15}) higher than the specific resistance of pure metals [4].

A new closed-loop sensorless method for reducing contact bounce on closure of a contactor has been proposed. Several approaches to the problem have already been described; most of them use some kind of sensor to establish the position and speed of the contacts in real time, whereas in our approach, the position and speed of the moving armature and contacts are calculated by using only the current and voltage values of the contactor coil as control inputs. A fuzzy controller takes as input the position and velocity of the armature and provides as output an intensity set point that controls the velocity of the closure of the contacts. Inexpensive electronic modules have been developed that implement the control system and integrate it into the contactor. The module eliminates the bounces completely and thus prevents the contacts from repeatedly making and breaking the circuit [6].

The authors of the article [7] gave a numerical assessment of the effect of pressing the contactor contacts in the power circuits of electric rolling stock on their plastic deformation and melting using the proposed engineering method.

Article [8] is devoted to experimental studies and numerical modeling of pulsed heating of high-current electrical contacts in a wide temperature range - up to the melting temperature. It is established that electrode welding begins when the temperature is significantly lower than the melting temperature. Features of the processes of softening and melting of the contact zone are described.

In the article [9], a mathematical model of a high-speed drive based on an IDM and a bistable mechanism was developed, which includes the equation of the electromagnetic field of an electric circuit and the equation of motion. The model correctly describes physical processes and can be used to develop and study the design of high-speed wires. On the basis of variable calculations, it is possible to solve the problems of finding the necessary

parameters of the drive with the aim of obtaining: a) a small value of the closing time of the contacts and avoiding "rattles" when switched on; b) high initial speed and overall low value of contact opening time (less than 1 ms), reduce dynamic loads and drive elements and contact system.

The article [10] discusses the method of determining the surface temperature of high-current breaking contacts operating with arcless alternating current commutation. The determination of the temperature was based on the numerical solution of the limiting inverse problem of thermal conductivity. Calculations of the temperature of the contact surfaces as a function of time have been obtained. The calculation was performed using the MathCAD application program package. The obtained temperature values using this technique are more accurate than when using the existing ones.

The article [11] presents the results of studies of electrothermal processes in the contacts of switching devices. The cause-and-effect factors of failure of switching devices of transformer equipment are analyzed. Methods of probabilistic analysis and experimental studies of contact resistance depending on non-sinusoidal current and the number of commutations are proposed.

Solving the problem of contacts, which are characteristic of electromagnetic contactors, is achieved by using electronic contactors using IGBT transistors. The IGBT transistor is a three-electrode power semiconductor device that combines two transistors in one semiconductor structure: bipolar (forming a power channel) and field (forming a control channel). This device has absorbed the positive properties of a bipolar transistor (high voltage between the collector and the emitter) and a field transistor (control is by means of an electric field, not by current as in a bipolar transistor) [12] - [16].

The development and improvement of circuitry using IGBT transistors is important. The authors of the article [17] proposed an improved hybrid direct current contactor, in which the introduction of new structural elements and connections allows for arc-free switching of the circuit when the device is turned on and off; allows you to use it in reversible switching schemes, to ensure the absence of a zone of possible switching with an arc, to ensure low dimensions, weight and cost of the contactor, to increase the reliability of its operation.

The IGBT transistor has a number of positive properties: light weight, not large size, power, high switching frequency, lack of physical wear, longer shelf life. Disadvantages include: price, a more complicated installation and debugging process, passive cooling is required for heat removal, power is lost at high switching frequencies (approximately 20-50 kHz) [18].

Analysis of research and publications devoted to various types of electric and electronic contactors allows us to consider the development and improvement of control schemes using IGBT transistors as relevant.

III. FORMULATION OF THE WORK PURPOSE

The purpose of this work is to develop and analyze the operation of a circuit for controlling a 700 W direct current electric motor using a contactor on IGBT transistors for operation in diesel locomotives.

IV. EXPOUNDING THE MAIN MATERIAL AND RESULTS ANALYSIS

The use of electromagnetic contactors in electric motor control circuits has the following features. When the control voltage is applied to the contactor coil (electromagnet), it immediately enters the saturation state and attracts the armature to the core, which in turn closes the contacts, and an electric current begins to flow in the electric power circuit. But it should be noted that when the voltage is turned off, the magnetic field of the coil

changes slowly, an EMF of self-induction occurs, under the influence of which the current will decrease slowly. Due to this, the time of switching off the contacts increases, or in general the armature can be kept in the closed position, and this can lead to the failure of the equipment, or even cause a fire.

To prevent the negative consequences that arise when using electromagnetic contactors, we have developed a basic electrical circuit for controlling an electric motor using IGBT transistors (Fig. 1). Such an electrical circuit can be used to control the operation of a direct current electric motor, namely, turning on or off a 700 W electric motor when working in a TEM-2 diesel locomotive.

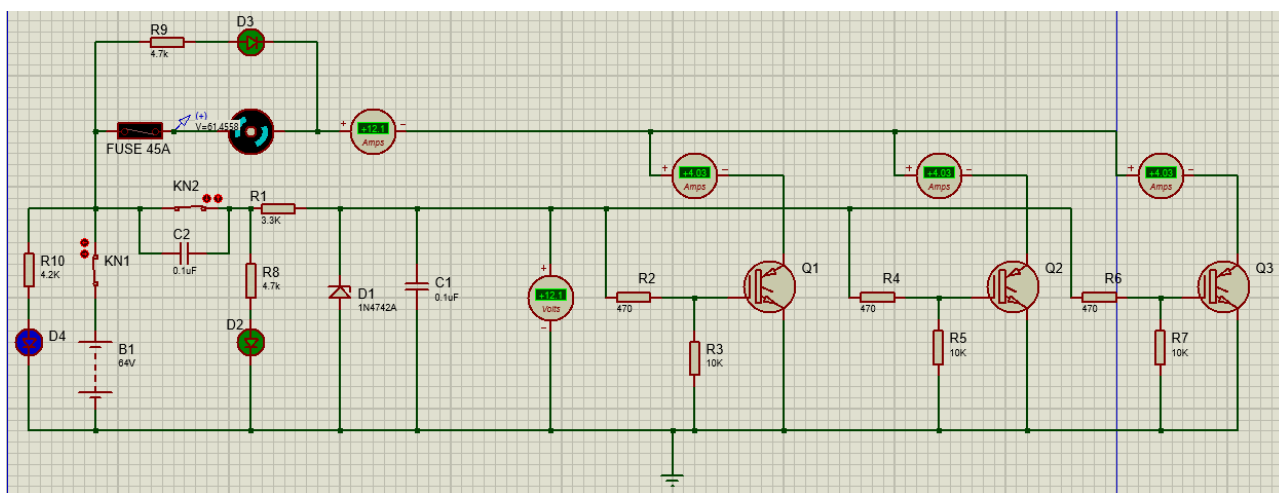


Figure 1. The basic electrical circuit for controlling a 700 W direct current electric motor using a contactor on IGBT transistors for operation in a TEM-2 diesel locomotive

The principle of operation of the electrical circuit is as follows. When the KN1 button is closed, the power indicator D4 lights up (blue color), which signals the operation of the battery. To turn on the electric motor, you need to close the KN2 button, the D2 indicator lights up (green color), which signals that the voltage is supplied to the parametric voltage stabilizer D1 through the resistor R1, which sets the stable operation of the Zener diode. The stabilization current is $I = 0.02$ A. After the Zener diode, we get a constant stabilized voltage of 12 V. The control voltage of 12 V is supplied through resistors R2, R4, R6 to the gates of the IGBT transistors, which are connected in parallel to distribute evenly the load between them. The transistors enter the saturation state and open, as a result of which the electric circuit of the motor is closed to minus (Ground) and an electric current begins to flow in the power electric circuit.

It can be seen from the diagram that the electric motor is supplied with a voltage of 60 V, a current of 12 A,

that is, the total power of the electric motor will be equal to

$$P = 60 \text{ V} \cdot 12 \text{ A} = 700 \text{ W}.$$

The load is evenly distributed on the IGBT transistors, as an electric current of 4 A flows through each IGBT transistor. Let's determine how much power each of them can withstand. As you know, the FGA25N120ANTD IGBT transistor dissipates 312 W of power. Since the power of one IGBT transistor is equal to:

$$P_{IGBT} = 700/3 = 233 \text{ W},$$

then there is a power reserve. But you should not forget about the cooling system of IGBT transistors, as it will ensure the prevention of possible emergency situations.

In the basic electrical circuit for controlling the electric motor, the D3 indicator is installed parallel to the motor. This is done for safety purposes: if the KN2 button is open (there is no control voltage on the gates of the IGBT transistors), and the engine continues to work, it means

that there is a short circuit to the ground (Ground), or the transistors have failed, or for some reason, the transistor does not enter the cutoff (opening) state.

Figure 2 shows graphs of the dependence of the voltage change on the IGBT transistors on the time during switching on and off.

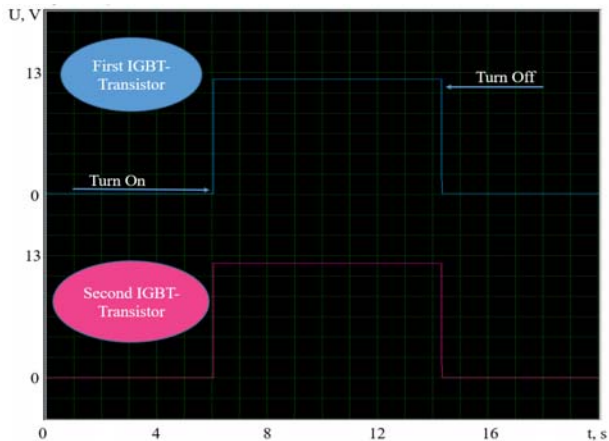


Figure 2. Graphs of the dependence of the voltage change on IGBT transistors on time during switching on and off.

The use of IGBT transistors in comparison with electromagnetic contactors shows a completely different result: switching on occurs almost instantly, and the voltage acquires the required value, that is, the IGBT transistor opens. This type of voltage change does not affect the operation of the equipment. When turned off, the IGBT transistor is completely closed, but no electric current flows through it. In this way, a safer mode of operation of the load is achieved.

Figure 3 shows the graph of the dependence of the voltage change on the electric motor when it is turned on.

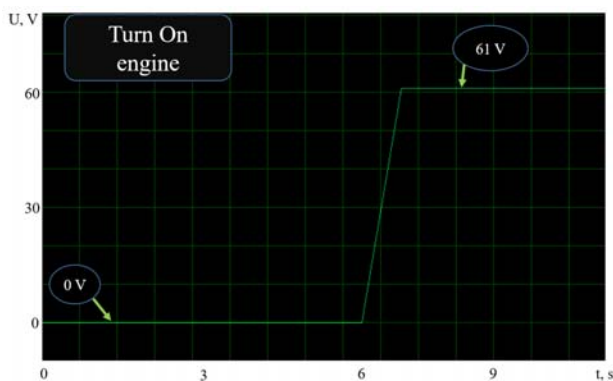


Figure 3. The graph of the dependence of voltage change on time for the electric motor when it is turned on.

The analysis of the load characteristics of the electric motor when it is turned on (Fig. 3) shows that in the initial section the voltage increases according to a linear law:

$$U = kt,$$

where k – the coefficient of proportionality, t – time.

After the initial increase in voltage, it reaches the set

value and the electric motor operates in the operating mode.

Figure 4 shows the graph of the voltage change versus time on the electric motor when it is turned off.

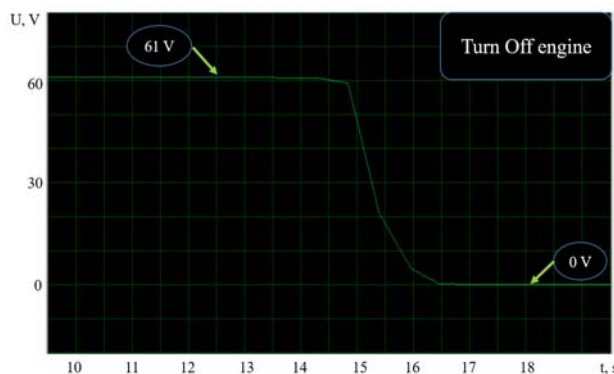


Figure 4. The graph of the dependence of voltage change on time for the electric motor when it is turned off.

Analysis of the load characteristic of the electric motor when it is turned off (Fig. 4) shows that when the power is turned off, the motor can't stop immediately; as the phenomenon of self-induction occurs (it becomes a generator). At the same time, self-induction voltage occurs, which falls on the collector of the transistor and can cause damage to it. But modern field-effect transistors have a diode in their structure that protects against such dangerous situations.

When the external voltage is turned off, its change on the electric motor occurs according to the exponential law:

$$U = U_0 e^{-\frac{t}{\tau}},$$

where U_0 – the saturation voltage, τ – the relaxation time.

The relaxation time characterizes the rate of change of the current in the circuit and, accordingly, the voltage on the electric motor and is determined by the value of the inductance and active resistance of the electric circuit:

$$\tau = L / R,$$

where L – circuit inductance, R – active circuit resistance.

This nature of the voltage change on the electric motor is explained by the fact that when the external voltage is turned off, the current through the inductance coil of the electromagnetic contactor decreases, which leads to the emergence of an EMF of self-induction, which will prevent the current from decreasing according to Lenz's rule.

Analysis of the graph of the voltage change versus time on the electric motor when it is turned off, shown in Figure 4, shows that when the external voltage on the IGBT transistor is turned off, its value decreases to zero almost instantly. That is, there are no transient processes that occur on the electromagnetic contactor. Thus, the use of an IGBT transistor to control the operation of an electric motor can't lead to equipment failure and is safer.

V. CONCLUSIONS

1. An electrical circuit for controlling a 700 W DC motor using IGBT transistors was developed.

2. A graphical analysis of the transient processes during switching on and off of the electric motor using a circuit based on IGBT transistors was carried out.

3. The analysis of the load characteristic of the electric motor at start-up shows that in the initial section the voltage increases according to a linear law.

4. The analysis of the load characteristics of the electric motor when it is turned off shows that when the power is turned off, the motor can't stop immediately, as the phenomenon of self-induction occurs. When the external voltage is turned off, its change on the electric motor takes place according to the exponential law.

5. It is shown that for controlling the operation of the electric motor, it is more appropriate to use an electrical circuit based on IGBT transistors, which provides conditions for more stable and safe operation of the electric motor.

REFERENCES

- [1] Kurbatova P. A. (2023). Jelektricheskie apparaty: uchebnik i praktikum dlja vuzov, Moscow : Izdatel'stvo Jurajt, 250.
- [2] Zhornjak L. B., Antonova M. V., Vasilevs'kij V. V. (2022). Elektrichni aparati avtomatiki ta keruvannja. Zaporizhzhja: NU «Zaporiz'ka politehnika», 414.
- [3] V. O. Les'ko, V. O. Komar, S. V. Kravchuk, O. V. Sikors'ka. (2018), Vinnicja Elektrichni aparati : navch. posib. VNTU, 102.
- [4] Klimentko B.V. (2012). K49 Elektrichni aparati. Elektro-mehanična aparatura komutacii, keruvannja ta za-histu. Zagal'nij kurs : navchal'nij posibnik. – Harkiv: Vid-vo «Tochka», 340.
- [5] Pressman, A. I. (1999). Switching Power Supply Design / A. I. Pressman. New York : McGraw-Hill, Inc., 677.
- [6] Antonio Garcia Espinosa, Jordi-Roger Riba. A Sensorless Method for Controlling the Closure of a Contactor. IEEE Transactions on Magnetics 43(10):3896 – 3903. DOI: 10.1109/TMAG.2007.904355
- [7] O. Y. Baliichuk, L. V. Dubynets, O. L. Marenych, D. V. Ustymenko. (2017). Influence of contactor contact pressure in power circuits of electric stock on their plastic deformation and fusing. Science and Transport Progress Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport, 2. (68), 81-91. DOI:10.15802/stp2017/100083
- [8] A. M. Chalyj, V. A. Dmitriev, M. A. Pavlejno, O. M. Pavlejno. (2013). Nagrev sil'notochnyh jelektricheskikh kontaktov udarnymi tokami korotkogo zamykanija . Jelektronnaja obrabotka materialov. Vol. 49, No 5, 81–88.
- [9] Baida, E. I., & Volkova, O. G. (2018). Matematichna model' shvidkodijuchogo privoda avtomatichnogo vidmikacha z indukcijno-dinamichnim ta bistabil'nim mehanizmom. Elektrotehnika ta elektroenergetika, (1), 30–39. <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2018-1-4>
- [10] Volkova, O. G. (2015). Metodika viznachennja temperaturi poverhni sil'nostrumnih rozrivnih kontaktiv u procesi komutacii. Elektrotehnika ta elektroenergetika, (1), 17–20. <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2015-1-3>
- [11] Zinovkin, V. V., Volkova, O. G., & Karpenko, V. V. (2008). Doslidzhennja elektrotermichnih procesiv v kontaktah peremikal'nih pristrojiv pri rizkoz-minnih navantazhennjah. Elektrotehnika ta elektroenergetika, (2). vilucheno iz <http://ee.zntu.edu.ua/article/view/102878>
- [12] Thomas Gilmore, Raymond G. Sladky. (2001). Ratings of Semiconductors for AC Drives. IEEE transactions on industry applications, Vol. 37, No. 2, 434-441.
- [13] A. G. Soskov, I.A. Soskova. (2005). Poluprovodnikovyje apparaty: kommutacija, upravlenie, zashhita: Uchebnik. Pod red. A.G.Soskova. Karavella, 344.
- [14] Ju. P. Kolontaevs'kij, A. G. Soskov. (2005). Elektronika i mikroshemotehnika: Pidručnik dlja studentiv vi-shhjih navch. Zakladiv. Za red. A.G.Soskova. Karavela, 384.
- [15] Ju.P. Kolontaevs'kij, A.G. Soskov. (2004). Promislova elektronika ta mikroshemotehnika: teorija i praktikum: Navch. posib. Za red. A.G.Soskova, 2-e vid. Karavela, 432.
- [16] L.V. Karpova, I.V. Gula. (2015). Zastosuvannja IGBT tranzistoriv dlja zadach keruvannja u silovij elektronici. Elektrotehnični ta radiotehnični vimirjuvannja, 2, 62-67.
- [17] A. G. Soskov, Ja. B. Forkun, N. O. Sabalaeva, (2012). Gibridnij dvopoljusnij kontaktor postijnogo strumu. Svitlotehnika ta elektroenergetika, 2, 55-60.
- [18] <https://www.ecstuff4u.com/2018/01/advantages-and-disadvantages-of-igbt.html>

Стаття надійшла до редакції 13.02.2023

ЕЛЕКТРИЧНА СХЕМА УПРАВЛІННЯ ЕЛЕКТРОДВИГУНОМ НА IGBT-ТРАНЗИСТОРАХ

ШИШКІН І.Р.

студент електротехнічного факультету Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: romarioizit7@gmail.com;

ЛУЩИН С.П.

канд. фіз.-матем. наук, доцент кафедри фізики Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: luschin@zntu.edu.ua;

Мета роботи. Розробка і аналіз роботи електричної схеми для керування електродвигуном постійного струму на 700 Вт із застосуванням контактора на IGBT-транзисторах для роботи у тепловозах.

Методи дослідження. Аналітико-розрахункові методи для розробки і аналізу роботи електричної схеми із застосуванням контактора на IGBT-транзисторах.

Отримані результати. Розроблена електрична схема керування електродвигуном постійного струму на 700 Вт із застосуванням IGBT-транзисторів. Схема дозволяє замінити електромагнітні контактори на IGBT-транзистори для покращення технічних характеристик та продуктивності роботи електродвигуна. Застосування IGBT-транзисторів дозволяє уникнути підгоряння контактних груп в порівнянні з електромагнітним контактором. Проведено графічний аналіз перехідних процесів при вмиканні і вимиканні електродвигуна із застосуванням схеми на IGBT-транзисторах. Аналіз навантажувальної характеристики електродвигуна при вмиканні показує, що на початковій ділянці зростання напруги відбувається за лінійним законом. Після початкового зростання напруги відбувається вихід його на задане значення і робота електродвигуна проходить у робочому режимі. Аналіз навантажувальної характеристики електродвигуна при вимиканні показує, що при відключенні живлення, двигун одразу зупиниться не може, так як має місце явище самоіндукції. При вимиканні зовнішньої напруги її зміна на електродвигуні відбувається за експоненціальним законом. Показано, що для керування роботою електродвигуна більш доцільно використання електричної схеми на IGBT-транзисторах, що забезпечує умови більш стабільної та безпечної роботи електродвигуна. Застосування електричної схеми дозволяє швидко знайти несправності для подальшого їх усунення. Електрична схема дозволяє уникнути фізичного зносу її електричних елементів.

Наукова новизна. Розроблена електрична схема для керування електродвигуном на сучасних електронних компонентах, яка дозволяє застосувати IGBT-транзистори замість електромагнітних контакторів. На підставі аналітико-розрахункового методу і графічного аналізу доведено доцільність використання IGBT-транзисторів замість електромагнітних контакторів.

Практична цінність. Розроблена електрична схема може бути застосована для керування електродвигуном постійного струму на 700 Вт для роботи в тепловозах. Запропонована електрична схема дозволяє збільшити мобільність ремонту в разі несправності шляхом заміни відповідного блоку.

Ключові слова: електрична схема керування електродвигуном; контактори; IGBT-транзистори; електродвигун постійного струму.

AUTOMATED METHODOLOGY OF CALCULATING PARAMETERS FOR NON-TRADITIONAL TECHNOLOGY OF HEATING MODE OF HYDRO-STORAGE POWER PLANT STATION

- OLISHEVSKIY I.H. PhD student and assistant of the Department of Information Security and Telecommunications, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: olishevskiyih@gmail.com;
- GUSEV O.YU. PhD, Professor of the Department of Information Security and Telecommunications, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: gusev1950@ukr.net;
- OLISHEVSKIY H.S. PhD, Associate Professor of the Department of Electric Power Engineering, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: olishevskiyg@ukr.net;

Purpose. Justification of the rational parameters of heat pumps and heat accumulators to ensure the efficient operation of the hydro storage power plant (HSPP) in the heating mode. Development of an automated methodology for calculating rational parameters for a complex system of a hydro storage power plant operating in heating mode.

Methodology. Mathematical analysis and modeling.

Findings. Using the developed automated calculation method, it was analyzed and determined that passing through the heat pump the full flow of water passing through the hydro unit is impractical and ineffective, because the energy consumption in the heat pump compressor is many times higher than the consumption of the hydro unit in pumping mode, which devalues the proposed measure as an energy-saving measure.

The use of a heat pump and a heat accumulator at the hydro storage power plant for hot water supply needs will save a third of conventional fuel costs compared to a boiler unit.

The developed automated technique allows to calculate the limit and rational values of design and operating parameters of the heat pump and heat accumulator, which ensure the heating mode of operation of the hydro storage power plant to meet the needs of hot water supply.

Originality. An automated methodology for calculating the parameters of a complex system has been developed for the hydro storage power plant operating in heating mode. The concept of the maximum heat capacity of the hot water supply of the heat pump Q_{gr} is introduced. The concept of the rational heat capacity of the hot water supply of the heat pump Q_{rac} is introduced. In addition to the maximum heat capacity and the rational heat capacity modes, the developed method allows you to calculate all the parameters of the heat pump and heat accumulator, which provide the heating mode of the hydro storage power plant, for arbitrary values of the thermal power of hot water supply, with further comparison and analysis of the investigated modes and the selection of the most promising one.

Practical value. The technology of using a heat pump and a heat accumulator to transfer the operation of the hydro storage power plant to the heating mode (hot water supply of residential buildings) is substantiated. The possibility of saving conditional fuel when applying the proposed technology is proven.

Keywords: heat pump; heat accumulator; automation; energy saving; hydro storage power plant; thermal power.

I. INTRODUCTION

The modern energy system of Ukraine is a flexible system consisting of generating and consuming components, which must be in continuous dynamic balancing. That is, it is necessary to constantly maneuver the relevant generating capacities, as well as consumer loads. The generating component is a set of power plants, different in design and principles of operation: nuclear, thermal, thermal power plants, hydro- and hydro-accumulating, solar, wind. At the moment, modern thermal power stations of average power (up to 200 MW) and hydro and, especially, hydro-accumulating stations (HPS) are the most suitable for maneuvering. Gas turbine plants, which are very efficient in terms of maneuvering, unfortunately do not have sufficient distribution in Ukraine today. At the same time, the energy system of Ukraine has signifi-

cant problems with a shortage of not only electrical but also thermal energy, especially in the cold season.

Therefore, it is necessary to use various technical improvements and non-traditional measures regarding the existing energy equipment in order to increase the maneuverability of the use of the existing generating capacities and the possibilities of energy-efficient transformation of some types of energy into others. This refers to mutual transformations of thermal and electrical energy, especially in their joint production.

II. ANALYSIS OF RESEARCH AND PUBLICATIONS

In previous studies, the authors considered a number of non-traditional technologies for useful transformations of electrical energy into thermal energy and thermal

energy into electrical energy, for various power plants. At the same time, a heat pump (HP) was used in all investigated energy-efficient technologies.

The principle of operation of the heat pump consists in the extraction of heat from various low-potential (low-temperature) energy sources with further transformation into high-temperature thermal energy and its transfer to the consumer. At the same time, energy is used to drive the heat pump compressor.

Thus, according to the results of research [1], carried out with the help of the developed appropriate methodology, the feasibility of using a heat pump in the thermal circuit of a condensing power plant (CPP) as a preliminary water heater after the turbine condenser was substantiated (Fig. 1).

According to the developed automated method, the rational temperature of the feed water preheating was determined under the conditions of maximum economy of conventional fuel, taking into account the energy consumption of the heat pump compressor.

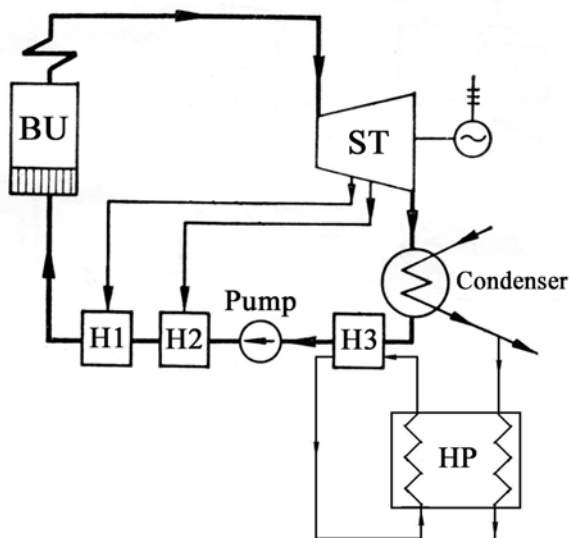


Figure 1. Scheme of application of the heat pump at the CPP: BU – boiler unit; H1, H2, H3 – water heaters; ST – Steam Turbine; HP – Heat Pump

For the conditions of the Kryvorizka CPP power unit with a condensing steam turbine of the K-300-240 KhTGZ type, the rational value of the water heating temperature in the heat pump was 82 °C, which ensured the maximum possible fuel saving of 6% [1].

Next, the possibility of using a heat pump in the heat circuit of the CPP as a water heater in the hot water supply system for domestic consumers was investigated (Fig. 2), which allowed the power plant to operate actually in the heating mode.

In this work, the rational mode of operation of the combined CPP+HP system was justified on the example of the already known power unit of the Kryvorizka CPP. According to the research results, the coefficient of heat

utilization for this system acquired a rational value of 78%, and the energy conversion coefficient was 7.2, which corresponds to a high level of efficiency of the HP [2].

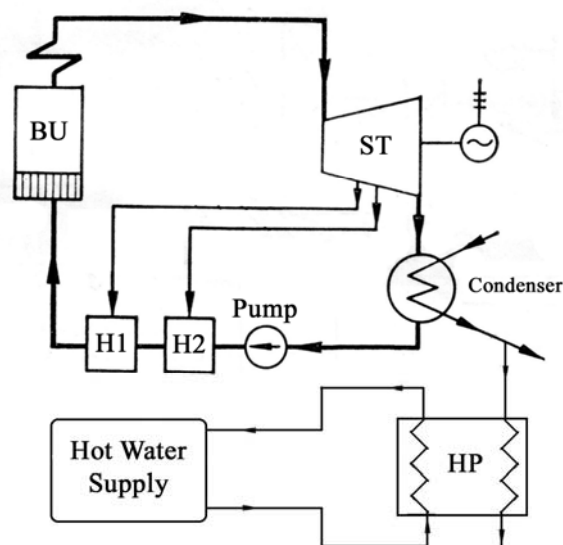


Figure 2. The scheme of application of the heating mode at the CPP: BU – boiler unit ; H1, H2 – water heaters before the BU; ST – Steam Turbine; HP – Heat Pump

Next, the effectiveness of the heat pump use, which utilizes the thermal energy of a power transformer, for various options of power plants was investigated. As a result, it was determined that the most rational scheme of utilization of thermal emissions of a power transformer TDNM - 160 MVA/330 kV is a heating scheme (energy conversion coefficient greater than 13), which has clear advantages from the point of view of saving energy resources and requires significantly lower capital and operating costs compared to other schemes. At the same time, the inefficiency of the use of the heat pump in micro-steam plants was proved [3].

The effectiveness of multi-stage heat pump installations was investigated in order to reduce the total energy consumption when reaching the specified heat capacity. The rationality of using a two-stage heating system, which provides an economy of 12% of conventional fuel, compared to one heat pump, was proven [4]. Schemes with more than four heat pumps have been proven to be less efficient.

The papers [5], [8] consider the main theoretical provisions on which the calculations in the study are based.

The source [6] defines the main legal, economic and organizational principles of activity at facilities in the field of heat supply and regulates relations related to the production, transportation, supply and use of thermal energy for the purpose of ensuring the energy security of Ukraine, increasing the energy efficiency of the functioning of heat supply systems, creating and

improving the heat energy market and protecting the rights of consumers and workers in the field of heat supply.

In work [7], an overview of heat pumps used in global practice was carried out. The state of the market of heat pumps in the world and Ukraine was studied, as well as the factors that slow down their implementation, types of heat pumps, schemes and principles of operation, sources of thermal energy of heat pump installations were considered. The advantages of heat pump installations over natural energy sources and the prospects of their use in Ukraine are also shown.

The paper [9] analyzed the energy efficiency of vapor compression heat pumps with electric and cogeneration drives. Effective and valid modes of operation of heat pumps with electric and cogeneration drives are determined, taking into account energy losses during the generation, supply and transformation of electric energy.

The paper [10] described ways to improve energy efficiency standards on the example of Korea, with the aim of increasing the level of investments in this area. Implementation of energy-saving technologies in various spheres of life.

In [11] we see the following results. Heat recovery of low pressure steam in steam condenser of thermal power plant was attractive because of its great economy and environmental value. This paper reported the experimental investigation results on the application of a heat pump water heater (HPWH) using low pressure steam in steam condenser as heat source. The working principles and features of the prototype heat pump were introduced. The effects of various parameters, including water flow rate and inlet temperature of heat pump condenser were investigated. Influence of vacuum pump on HPWH was also discussed. Results show that performance of HPWH is governed strongly by the change of water flow rate and inlet water temperature of heat pump condenser and vacuum pump. Maximum outlet water temperature of the test HPWH is 65°C and the maximum coefficient of performance (COP) is 4.5.

The work [12] presents a computationally cost-effective numerical model that successfully simulates a heat pump water heater (HPWH) under typical working conditions of dwellings. The model's main components are a stratified tank and the heat-pump unit. Both systems are coupled, since a good prediction of water temperature is needed to predict accurately the heat-pump performance. Ten thermocouples measured the tank wall temperature. Measurements and simulations were performed under challenging conditions of a heavy stratification. The 190 L tank stratification was successfully modeled employing a 1D model, experimentally adjusted by three tapping cycles, with 6×22 , 6×33 , and 3×33 L consumptions, covering flowrates of 4 and 6 L/min. Water temperature is obtained with an uncertainty of 2.6 °C while the heat-pump was ON. A black box model has

been used to obtain the heat-pump performance out of the external and condenser temperatures. For the analyzed days, the COP estimation presents an uncertainty of only 5.1%. Finally, an application example is included. It was used to simulate six tapping cycles of the European standard for heat pump water heaters testing (EN 16147). The results show the possibilities for heat-pump manufacturers of applying this calibrated model to predict the performance of HPWHs under different conditions.

The paper [13] is an advanced experimental rig for heat pump water heaters. The performances of both a phase change heat-storage-type heat pump water heater (Type A) and a conventional heat pump water heater (Type B) were tested and compared according to GB/T 23137-2008 using the experimental rig. The results showed that the existence of phase transition temperature platform enabled the phase change heat-storage-type heat pump heater run longer and more steadily. When the same hot water heat capacity obtained, the volume of the accumulator in the Type A water heater accounted for about 56.9% of that of the water tank in the Type B water heater, which could save the overall size of water heater significantly and therefore promote the wide application of energy-saving heat pump water heaters.

The work [14]. A survey for water heater in urban residential buildings is carried in Wuhan. The results show that more than 40% subjects use solar energy water heat. More than 20% subjects point out the energy consumption of water heater should be decreased. There are about 24.8% subjects take initial cost as the first place when they chose water heater. 44.2% subjects know about heat pump water heater, but they could not buy it if the initial cost is too high. There are 84% subjects could select heat pump water heater when the cost is no more 20% high than the average price of the common water heaters. Moreover, the energy consumptions of residential water heaters are also investigated.

An experiment was carried out in work [15]. The performance parameters of the WSHPWH system were analyzed at different evaporator water fluxes. The heating time decreased as the evaporator water flux increased. As suggested by the condenser shell and tube side temperature at different evaporator water fluxes, the condenser is inefficient. When attaining the same temperature, the exergy efficiency of the condenser was lower than those of the other equipment. Thus, it is essential to reduce its energy destruction when the heating efficiency of the WSHPWH system is improved.

In the study [16], regulation systems that can be used for our development are considered.

From the reviewed studies, we can conclude that the use of heat pumps is not a panacea for all energy saving measures, but requires conscientious research and justification in each specific case.

Based on the listed studies, an idea was proposed regarding the introduction of non-traditional technology of applying the heating mode of operation of the gas

station for the needs of hot water supply.

III. FORMULATION OF THE WORK PURPOSE

Justification of the rational parameters of the heat pump and heat accumulator to ensure the efficient operation of the hydro storage power plant in the heating mode. Development of an automated methodology for calculating rational parameters for a complex system of the hydro storage power plant operating in the heating mode.

IV. EXPOUNDING THE MAIN MATERIAL AND RESULTS ANALYSIS

The technology of applying the heating mode of operation of the HSPP for the needs of hot water supply (HWS) was investigated. To implement this idea, it was decided to use a heat pump (HP), as well as, taking into account the peculiarities of the operation mode of the HSPP, a heat accumulator (HA). That is, when the hydro storage power plant is operating in pumping mode, the HP takes low-potential thermal energy from part of the pumped water flow and heats water for consumers in the HA (Fig. 3).

The HSPP operates in two modes: pumping mode, consuming waste energy from nuclear and thermal power stations during low-load nighttime, when water is pumped from the lower to the upper catchment, and also in turbine mode, when water is discharged from the upper reservoirs to the lower ones in hours of maximum electricity consumption in the system. At the same time, more energy is consumed in the pumping mode than is produced in the turbine mode, which is reflected in the values of the HSPP efficiency.

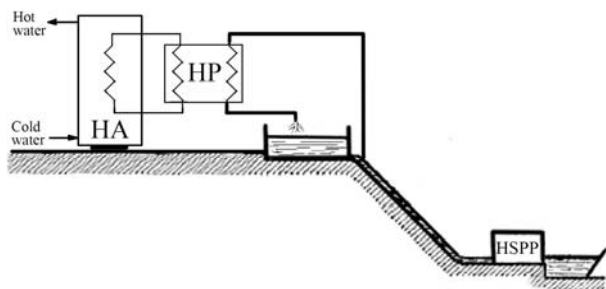


Figure 3. Scheme of the heating mode application at the hydro storage power plant

HP is a steam-compressor unit that operates according to the main refrigeration cycle. For this technology, on the basis of the p, i diagram of the selected refrigerant (Freon-11), the functions of changing the parameters of the refrigeration cycle from the heat capacity of the condenser and the condensation temperature of the refrigerant at the evaporation temperature of the refrigerant of 2 °C were determined.

As a result of the periodic and intermittent nature of the HSPP operation in pumping mode, HA was involved. As TA, a displacing liquid heat accumulator based on water was used. It is cheap enough, technological in

production, reliable and safe in operation, and affordable in terms of the materials and substances used.

The RONT-B-675 hydraulic unit installed at the Kanivska GA-ES was accepted as the research object. The power of this unit in generator mode is 250 MW (efficiency 88%), and in pump mode 260 MW (efficiency 75%).

The water in the HA is heated from 5 to 60 °C (for the cold period). Accordingly, the refrigerant condensation temperature is set at 65 °C.

The automated methodology of calculating the parameters of the HSPP complex system operating in the heating mode includes the following algorithm of actions:

1. Assignment of capacities according to the main modes of the hydro unit, the geometric pressure of the station, the initial and final temperatures of the water that gives heat to the HP and water in the HA, physical parameters of water and refrigerant, technical parameters of heat pumps.

2. Formation of the functions of changing parameters of the refrigerating cycle from the heat capacity of the condenser and the condensation temperature of the refrigerant for constant evaporation temperatures, necessary for modeling the operation of heat pumps.

3. Determination and analysis of energy parameters of HP operation for the maximum possible flow of water through the hydraulic unit.

4. Formation of the dependence function of the conventional fuel total consumption by the hydraulic unit in pumping mode and the HP compressor and the function of the dependence of the conventional fuel total consumption for the generator mode and the boiler on the thermal power of the HWS system (condenser of the HP).

5. Determination of the limit value of the HWS capacity and the corresponding HP and HA parameters.

6. Formation of the dependence function of the sum of the hydraulic unit capacities in pumping mode and the HP compressor drive on the thermal power of the HWS system (HP condenser). The formation of the dependence function of the sum of the hydro unit power for the generator mode and the thermal power of the HP on the thermal power of the HWS system (condenser of the HP).

7. Determination of the rational value of the HWS capacity and the corresponding parameters of HP and HA.

8. Determination of HP and HA parameters for an arbitrary value of HWS capacity.

9. Analysis and comparison of the HP and HA parameters obtained above for different values of the HWS capacity and the selection of a more profitable heating operation mode of the HSPP.

According to this technology, the operation of the RONT-B-675 hydrounit in the heating mode for various heat loads of the hot water system was investigated.

First, the maximum thermal power of the HP, which

can be obtained from the full flow of water passing through the hydro unit (3.337 GW), as well as the power of the compressor drive, which will ensure this mode (979 MW), is determined. Comparing this value with the power of the hydro unit in pumping mode (260 MW), we can conclude that it is not appropriate for the heat pump to use the energy of the entire flow of pumped water, because there is no need for such a large amount of heat, and the cost of the HP drive is 3.7 times exceed the costs of the hydraulic unit in pumping mode. That is, the meaning of this energy-saving measure is lost.

Therefore, it was decided to substantiate the marginal and rational values of thermal capacities of HP, which would improve the existing system, and not transform it into a completely different one.

The concept of the ultimate heat capacity HWS (HP) Q_{zp} is proposed. This is the power at which the total consumption of conventional fuel for the hydraulic unit in pumping mode and the HP compressor will be equal to the total consumption of conventional fuel for the generator mode and the boiler unit (BU). Then, in order to calculate this maximum heat capacity, two functions of the corresponding total costs of conventional fuel were formed depending on the heat capacity of the HWS system and their combined solution was performed, which is graphically displayed (Fig. 4).

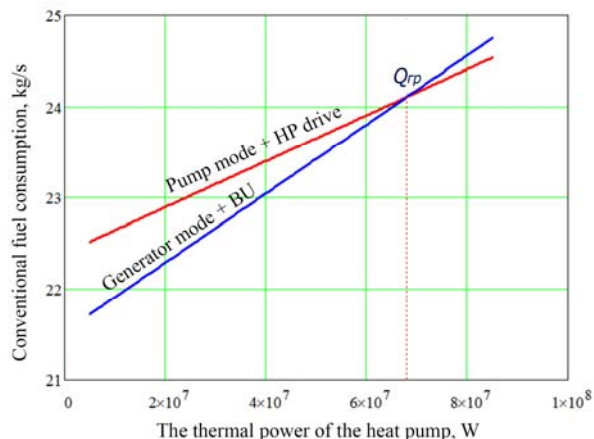


Figure 4. Determination of the maximum heat capacity of the HWS

For our case, under the described conditions and in accordance with the methodology, the maximum heat capacity of the HWS was determined, above which it is impractical to rise. It is equal to 68 MW, and the corresponding power of the HP compressor will be 20 MW, the volume of TA is 5509 m³, the number of consumers is 55094 people, the economy of conditional fuel in comparison with BU is 33%.

The concept of rational thermal power of HWS (HP) Q_{pau} was introduced. This is the power at which the sum of the power of the hydraulic unit in pumping mode and the HP compressor drive will be equal to the sum of the power of the hydro unit in generator mode and the

thermal power of the HP. To calculate this rational heat capacity, two functions of the corresponding total capacities were formed depending on the heat capacity of the domestic hot water system and their combined solution was performed, which is graphically displayed (Fig. 5).

For our case, under the described conditions and in accordance with the methodology, the rational heat capacity of the hot water heater, which is the most convenient to provide, was determined. It is equal to 14 MW, and the corresponding power of the TN compressor will be 4 MW, the volume of the HA is 1146 m³, the number of consumers is 11460 people, and the conventional fuel economy in comparison with the BU is 33%.

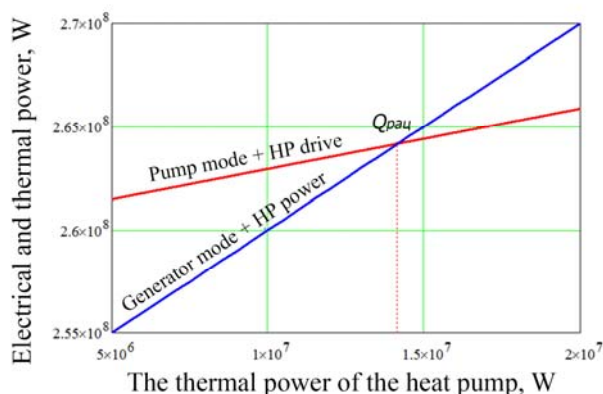


Figure 5. Determination of the rational heat capacity of the HWS

In addition to the given limit and rational modes, the automated technique allows you to calculate all the HP and HA parameters that provide the heating mode of the HSPP for arbitrary values of the thermal power of the HWS with further comparison and analysis of the investigated modes and the selection of the most promising one.

V. CONCLUSION

The technology of using a heat pump and a heat accumulator to transfer the operation of the gas station to the heating mode (hot water supply of residential buildings) is substantiated. An automated method for determining the rational parameters of HP and HA for the implementation of the heating technology of the HSPP has been developed. The following provisions were obtained.

1. Using the developed automated calculation method, it was analyzed and determined that the passage of the full flow of water passing through the hydraulic unit through the HP is impractical and inefficient, because the energy consumption in the HP compressor many times exceeds the consumption of the hydro unit in pumping mode, which devalues the proposed measure as energy-saving.

2. The use of a heat pump and a heat accumulator at

the HSPP for hot water supply needs will save a third of conventional fuel consumption compared to a boiler unit.

3. The developed automated method allows to calculate the limit and rational values of the design and mode parameters of HP and HA, which ensure the heating mode of operation of the gas power plant to meet the needs of hot water supply.

REFERENCE

- [1] Olishevskiy, H., & Olishevskiy, I. (2017). Justification of the method of heat utilization of the air conditioning system for the heat pump heating system. *Information systems, mechanics and control*, (17), 86–94. <https://doi.org/10.20535/2219-3804172017102874>
- [2] Olishevskiy, H., & Olishevskiy, I. (2014). Obgruntuvannya zastosuvannya teplonasosnogo obladnannya dlja teplofikacijnogo rezhimu kondensacijnih elektrostancij. *Visnik Dnipropetrovs'kogo universitetu*, (22), 135–140. URL: <http://rocketspace.dp.ua/index.php/rst/issue/view/2>
- [3] Olishevskiy, H., & Olishevskiy, I. (2015). Obgruntuvannya zastosuvannya teplonasosnogo obladnannya dlja utilizacii teplovih vtrat v silovih transformatorah velikoi potuzhnosti / H.S. Olishevskiy, I.H. Olishevskiy // *Visnik Dnipropetrovs'kogo universitetu*, (23), 131–136. URL: <http://rocketspace.dp.ua/index.php/rst/issue/view/4>
- [4] Olishevskiy I.H. (2015). Obgruntuvannya racional'noi shemi teplonasosnoi sistemi opalennja. *Mehanika giroskopichnih system*, (30), 26–35. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/mgs_2015_30_5 DOI: <http://dx.doi.org/10.20535/0203-377130201573171>
- [5] Tkachenko S.J., Ostapenko O.P. (2009). Parokompresijni teplonasosni ustanovki v sistemah teplopostachannja: monografija. Vinnicja : VNTU.
- [6] Zakon Ukraïni №1959-VIII vid 21.03.2017 «Pro vnesennja zmin do Zakonu Ukraïni «Pro teplopostachannja» shhodo stimuljuvannja virobnictva teplovoi energii z al'ternativnih dzherel energii».
- [7] Tkachuk K.K.. (2015). Perspektivi zastosuvannja teplovih nasosiv v Ukraïni, *Visnik NTUU "KPI"*, (27), 144–153.
- [8] Arsen'ev V.M., Melejchuk S.S. (2018). Teplovi nasosi: osnovi teoriji i rozrahunku. SDU.
- [9] Ostapenko, O. P., Leshhenko, V. V., & Tihonenko, R. O. (2014). *Energetichna efektyvnist' parokompresijnih teplovih nasosiv z elektrichnim ta kogeneracijnim privodami*.
- [10] Jin, T. (2022). Improving Korean Energy Efficiency Resource Standards to Vitalize Energy Efficiency Investment. *Journal of Energy Engineering*, 31(2), 87–97. <https://doi.org/10.5855/energy.2022.31.2.087>.
- [11] Fan, J., Sun, F. Z., & Gao, M. (2013). Experimental Research on a Heat Pump Water Heater Using Low Pressure Steam as Heat Source. *Advanced Materials Research*, 805-806, 637–644. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.805-806.637>.
- [12] Aguilar, F., Crespi-Llorens, D., Aledo, S., & Quiles, P. V. (2021). One-Dimensional Model of a Compact DHW Heat Pump with Experimental Validation. *Energies*, 14(11), 2991. <http://dx.doi.org/10.3390/en14112991>.
- [13] Ding, D. F., Chai, J. H., Wang, L. F., & Chen, W. (2013). An Experimental Research on a Phase Change Heat-Storage-Type Heat Pump Water Heater. *Applied Mechanics and Materials*, 448-453, 3413–3416. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.448-453.3413>.
- [14] Zhou, Z. X. (2014). Statistical Analyses on Usage of Water Heater in Urban Residential Buildings. *Applied Mechanics and Materials*, 521, 748–751. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.521.748>.
- [15] Zhao, Z., Zhang, Y., Mi, H., Zhou, Y., & Zhang, Y. (2018). Experimental Research of a Water-Source Heat Pump Water Heater System. *Energies*, 11(5), 1205. <https://doi.org/10.3390/en11051205>
- [16] Pérez-Lombard, L., Ortiz, J., Coronel, J. F., & Maestre, I. R. (2011). A review of HVAC systems requirements in building energy regulations. *Energy and Buildings*, 43(2-3), 255–268. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.10.025>

Стаття надійшла до редакції 05.02.2023

АВТОМАТИЗОВАНА МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ ДЛЯ НЕТРАДИЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ТЕПЛОФІКАЦІЙНОГО РЕЖИМУ ГІДРОАКУМУЛЮЮЧОЇ СТАНЦІЇ

ОЛШЕВСЬКИЙ І.Г.

аспірант та асистент кафедри безпеки інформації та телекомунікацій НТУ «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна, e-mail: olishevskiyih@gmail.com;

ГУССВ О.Ю.

к.ф.-м.н., професор кафедри безпеки інформації та телекомунікацій, НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна, e-mail: gusev1950@ukr.net;

ОЛІШЕВСЬКИЙ Г. С. к.т.н., доцент кафедри електроенергетики НТУ «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна, e-mail:;

Мета роботи. Обґрунтування раціональних параметрів теплових насосів та теплових акумуляторів для забезпечення ефективної роботи ГАЕС в теплофікаційному режимі. Розробка автоматизованої методики розрахунку раціональних параметрів для комплексної системи ГАЕС, що працює в теплофікаційному режимі.

Методи дослідження. Математичний аналіз та моделювання.

Отримані результати. Використовуючи розроблену автоматизовану методику розрахунку було проаналізовано та визначено, що пропускання через тепловий насос повного потоку води, що проходить крізь гідроагрегат недоцільне та неефективне, тому що енерговитрати в компресорі теплового насосу в рази перевищують витрати гідроагрегату в насосному режимі, що знецінює запропонований захід як енергозберігаючий.

Застосування теплового насосу та теплового акумулятора на ГАЕС для потреб гарячого водопостачання дозволить на третину зекономити витрати умовного палива у порівнянні з котельним агрегатом.

Розроблена автоматизована методика дозволяє обчислювати граничні та раціональні значення конструктивних та режимних параметрів теплового насосу та теплового акумулятору, які забезпечують теплофікаційний режим роботи ГАЕС для забезпечення потреб гарячого водопостачання.

Наукова новизна. Розроблено автоматизовану методику розрахунку параметрів комплексної системи

ГАЕС, що працює в теплофікаційному режимі. Введено поняття граничної теплової потужності гарячого водопостачання теплового насосу $Q_{гр}$. Введено поняття раціональної теплової потужності гарячого водопостачання теплового насосу $Q_{рац}$. Крім граничного та раціонального режимів, розроблена методика дозволяє розраховувати усі параметри теплового насосу та теплового акумулятору, що забезпечують теплофікаційний режим ГАЕС, для довільних значень теплової потужності гарячого водопостачання, з подальшим порівнянням та аналізом досліджуваних режимів й вибором найбільш перспективного.

Практична цінність. Обґрунтовано технологію застосування теплового насосу та теплового акумулятора для переведення функціонування ГАЕС в теплофікаційний режим (гаряче водопостачання житлових будівель). Доведено можливість економії умовного палива при застосуванні запропонованої технології.

Ключові слова: Тепловий насос; тепловий акумулятор; автоматизація; енергозбереження; гідроакумуляюча електростанція; тепла потужність.